



Praktis Belajar

Fisika

untuk Kelas XII

Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Adit Suganda

3



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Praktis Belajar

Fisika

untuk Kelas XII

Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah
Program Ilmu Pengetahuan Alam

Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Adit Suganda

3



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

Praktis Belajar Fisika

untuk Kelas XII

Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah

Penulis : Aip Saripudin
Dede Rustiawan K.
Adit Suganda
Penyunting : Firdaus Sukmono
Debby Juwita
Pewajah Isi : Yusuf Sobari
Ilustrator : Yudiana
Pewajah Sampul : Dasiman

530.07

AIP
p

AIP Saripudin

Praktis Belajar Fisika 3 : untuk Kelas XII Sekolah Menengah Atas /
Madrasah Aliyah Program Ilmu Pengetahuan Alam / penulis, Aip Saripudin,
Dede Rustiawan K, Adit Suganda ; penyunting, Firdaus Sukmono, Debby Juwita
; ilustrator, Yudiana. — Jakarta : Pusat Perbukuan ;Departemen Pendidikan
Nasional, 2009.

viii, 260 hlm. : ilus. ; 30 cm.

Bibliografi : hlm. 258

Indeks

ISBN 978-979-068-812-4 (No. Jil Lengkap)

ISBN 978-979-068-815-5

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II. Dede Rustiawan K
III. Adit Suganda IV. Firdaus Sukmono V. Debby Juwita
VI. Yudiana

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit Visindo Media Persada

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2009

Diperbanyak oleh

Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Sekarang ini, ilmu dan teknologi berkembang dengan pesat. Seiring dengan perkembangan tersebut, Fisika sebagai bagian dari ilmu dan teknologi ikut berkembang pula, baik itu teori maupun penerapannya.

Fisika adalah ilmu dasar teknologi. Fakta-fakta kehidupan, seperti gerak, cahaya, optik, kalor, dan materi lain yang sehari-hari digunakan manusia dipelajari dalam Fisika.

Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan kualitas pendidikan Fisika di sekolah agar membentuk manusia yang memiliki daya nalar dan daya pikir yang baik, kreatif, cerdas dalam memecahkan masalah, serta mampu mengomunikasikan gagasan-gagasannya. Pendidikan Fisika harus dapat membantu Anda menyongsong masa depan dengan lebih baik.

Atas dasar inilah, kami menerbitkan buku **Praktis Belajar Fisika** ini ke hadapan Anda, khususnya para siswa Sekolah Menengah Atas. Buku ini menghadirkan aspek kontekstual bagi Anda dengan mengutamakan pemecahan masalah sebagai bagian dari pembelajaran untuk memberikan kesempatan kepada Anda membangun pengetahuan dan mengembangkan potensi diri.

Materi dalam buku ini diharapkan dapat membawa Anda untuk memperoleh pemahaman tentang ilmu Fisika sebagai proses dan produk. Materi pelajaran Fisika yang disajikan bertujuan membekali Anda dengan pengetahuan, pemahaman, dan sejumlah kemampuan untuk memasuki jenjang yang lebih tinggi, serta mengembangkan ilmu Fisika dalam kehidupan sehari-hari.

Oleh karena itu, mendudukan **Praktis Belajar Fisika** hanya sebatas teori di dalam kelas, akan membuat siswa kurang memahaminya dan menghambat tercapainya tujuan pembelajaran. Melalui buku **Praktis Belajar Fisika** ini, Anda diharapkan dapat menyenangi pelajaran Fisika.

Materi-materi bab di dalam buku ini disesuaikan dengan perkembangan ilmu dan teknologi terkini. Selain itu, buku ini disajikan dengan bahasa yang mudah dipahami dan komunikatif sehingga seolah-olah Anda berdialog langsung dengan penulisnya. Penulisan buku ini diharapkan dapat menjadi salah satu media atau sarana belajar Fisika.

Kami menyadari bahwa penerbitan buku ini tidak akan terlaksana dengan baik tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, dengan hati yang tulus, kami ucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan yang diberikan. Semoga buku ini dapat memberi kontribusi bagi perkembangan dan kemajuan pendidikan di Indonesia.

Jakarta, Mei 2007

Penerbit

Sekilas Isi Buku

Buku **Praktis Belajar Fisika** untuk Kelas XII ini terdiri atas sembilan bab, yaitu Gelombang dan Sifat-Sifatnya, Gelombang Bunyi dan Cahaya, Elektrostatika, Induksi Magnet, Induksi Elektromagnetik dan Arus Listrik Bolak-Balik, Teori Kuantum, Teori dan Model-Model Atom, Teori Relativitas Khusus, serta Fisika Inti dan Radioaktivitas.

Di setiap awal bab disajikan *Advance Organizer* dan **Soal Pramateri**. *Advance Organizer* yang dilengkapi dengan **Gambar Pembuka Bab** berisi contoh-contoh penerapan atau manfaat dalam kehidupan sehari-hari yang dapat merangsang keingintahuan Anda tentang materi yang akan dipelajari. Adapun Soal Pramateri merupakan uji awal pengetahuan umum Anda tentang materi yang akan dipelajari yang dapat mengembangkan kecakapan personal Anda. Untuk membantu Anda memahami materi pelajaran, **Gambar** dan **Ilustrasi** disajikan secara menarik dan faktual. Selain itu, disajikan pula tugas **Kerjakanlah** yang merupakan tugas sederhana berupa soal dan kegiatan ilmiah yang dapat mengembangkan kecakapan sosial dan akademik Anda. Ada pula kegiatan **Mahir Meneliti** dan **Kegiatan Semester** yang perlu Anda kerjakan secara mandiri maupun berkelompok. Kedua kegiatan tersebut dapat menumbuhkan semangat kewirausahaan, etos kerja, semangat inovasi/kreativitas, daya saing, kecakapan sosial, dan dapat mengembangkan kecakapan hidup (*life skill*) Anda.

Di setiap akhir materi pelajaran disajikan **Soal Penguasaan Materi** sebagai bahan evaluasi pemahaman Anda tentang materi yang telah dipelajari, ringkasan materi dalam bentuk **Rangkuman** dan **Peta Konsep**. Selain itu, di setiap akhir bab dan akhir semester disajikan **Evaluasi Materi Bab** dan **Evaluasi Materi Semester**. Adapun di akhir buku terdapat **Evaluasi Materi Akhir Tahun** menguji pemahaman Anda setelah mempelajari materi pelajaran selama satu tahun.

Materi pelajaran dalam buku **Praktis Belajar Fisika** ini juga disertai dengan materi pengayaan, di antaranya:

1. Jangan Lupa

Disajikan untuk mengingat materi yang telah dipelajari sebelumnya yang dapat mengembangkan kecakapan personal Anda.

2. Perlu Anda Ketahui

Berisi informasi yang dapat merangsang keingintahuan Anda sehingga mendorong Anda untuk mencari informasi lebih jauh.

3. Loncatan Kuantum (*Quantum Leap*)

Pengayaan yang bersifat informatif ini disajikan secara bilingual sehingga dapat memperdalam ilmu bahasa Inggris Anda sehingga dapat mengembangkan kecakapan personal Anda.

4. Jelajah Fisika

Jelajah Fisika memberikan informasi seputar Fisika termasuk semangat para tokoh Fisika dalam menemukan/menciptakan karyanya dan teknologi dalam dunia Fisika yang dapat menumbuhkan semangat kewirausahaan, etos kerja serta dapat merangsang keingintahuan Anda.

5. Perlu Anda Ketahui

Berisi informasi yang dapat merangsang keingintahuan Anda sehingga mendorong Anda untuk mencari informasi lebih jauh.

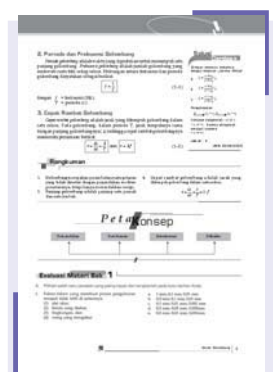
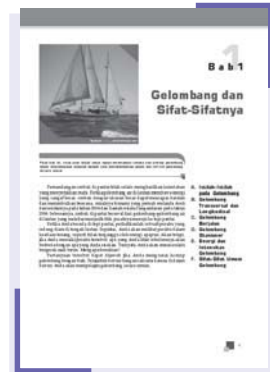
6. Pembahasan Soal SPMB

Pembahasan Soal SPMB membahas soal-soal SPMB yang berkaitan dengan materi yang Anda pelajari.

7. Solusi Cerdas

Merupakan pembahasan soal UAN yang diberikan dengan menggunakan solusi secara praktis dan cepat.

Untuk membantu Anda dalam menggunakan buku **Praktis Belajar Fisika** ini, pada bagian akhir buku ini disajikan **Apendiks**, **Kamus Fisika**, dan **Indeks**.



Daftar Isi

Kata Sambutan • iii

Sekilas Isi Buku • iv

Kata Pengantar • v

Semester 1

Bab 1

Gelombang dan Sifat-Sifatnya	1
A. Istilah-Istilah pada Gelombang	2
B. Gelombang Transversal dan Longitudinal	5
C. Gelombang Berjalan	7
D. Gelombang Stasioner	9
E. Energi dan Intensitas Gelombang	12
F. Sifat-Sifat Umum Gelombang	13
Evaluasi Materi Bab 1	20

Bab 2

Gelombang Bunyi dan Cahaya	23
A. Gelombang Bunyi	24
B. Cahaya sebagai Gelombang	38
Evaluasi Materi Bab 2	52

Bab 3

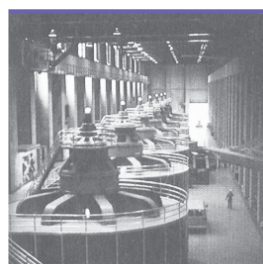
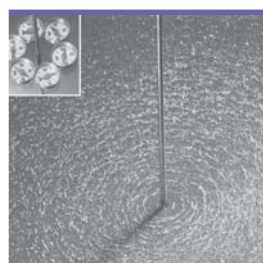
Elektrostatika	55
A. Benda Bermuatan Listrik	56
B. Hukum Coulomb	58
C. Medan Listrik	62
D. Potensial Listrik	69
E. Kapasitor	73
Evaluasi Materi Bab 3	81

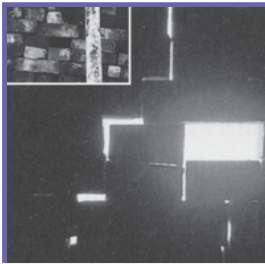
Bab 4

Induksi Magnet	85
A. Medan Magnet	86
B. Gaya Magnet	95
C. Lintasan Partikel Bermuatan dalam Medan Magnet Seragam	100
D. Momen Gaya Magnet dan Motor Listrik	103
Evaluasi Materi Bab 4	108
Kegiatan Semester 1	111

Bab 5

Induksi Elektromagnetik dan Arus Listrik Bolak-Balik	113
A. Induksi Elektromagnetik	114
B. Beberapa Aplikasi Induksi Elektromagnetik	126
C. Persamaan Arus Listrik Bolak-Balik	130
D. Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik ...	135
E. Rangkaian AC RLC Seri	138
F. Daya pada Rangkaian AC	142
Evaluasi Materi Bab 5	147
Evaluasi Materi Semester 1	151





Semester 2

Bab 6

Teori Kuantum	155
A. Radiasi Benda Hitam	156
B. Efek Fotolistrik dan Teori Foton Einstein	161
C. Efek Compton	164
D. Hipotesis de Broglie	165
Evaluasi Materi Bab 6	169

Bab 7

Teori dan Model-Model Atom	173
A. Teori Atom Dalton	174
B. Penemuan Elektron dan Model Atom Thomson	174
C. Model Atom Rutherford	177
D. Spektrum Atom Hidrogen	178
E. Model Atom Bohr	180
Evaluasi Materi Bab 7	188

Bab 8

Teori Relativitas Khusus	191
A. Teori Relativitas Newton	192
B. Eksperimen Michelson–Morley	193
C. Postulat Einstein untuk Teori Relativitas Khusus	195
D. Kesetaraan Massa dan Energi	201
Evaluasi Materi Bab 8	206

Bab 9

Fisika Inti dan Radioaktivitas	209
A. Struktur Inti	210
B. Radioaktivitas	213
C. Teknologi Nuklir	220
Evaluasi Materi Bab 9	226
Kegiatan Semester 2	229
Evaluasi Materi Semester 2	231
Evaluasi Materi Akhir Tahun	234
Kunci Jawaban	240
Apendiks	245
Kamus Fisika	251
Indeks	254
Daftar Pustaka	258

B a b 1



Sumber: www.yachtshonalanga.com

Gelombang dan Sifat-Sifatnya

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep dan prinsip gelombang dalam menyelesaikan masalah dengan cara mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum.

Pemandangan ombak di pantai tidak selalu menghasilkan keindahan yang menyejukkan mata. Ketika gelombang air di lautan membawa energi yang sangat besar, ombak dengan ukuran besar dapat mencapai daratan dan menimbulkan bencana, misalnya tsunami yang pernah melanda Aceh dan sekitarnya pada 2004 dan daerah wisata Pangandaran pada 2006. Sebenarnya, ombak di pantai berawal dari gelombang-gelombang air di lautan yang melebar menjauhi titik pusatnya menuju ke tepi pantai.

Ketika Anda berada di tepi pantai, perhatikanlah sebuah perahu yang sedang diam di tengah lautan. Sepintas, Anda akan melihat perahu dalam keadaan tenang, seperti tidak terganggu oleh energi apapun. Akan tetapi, jika Anda menaiki perahu tersebut, apa yang Anda lihat sebelumnya akan berbeda dengan apa yang Anda rasakan. Ternyata, Anda akan merasa selalu bergerak naik turun. Mengapa demikian?

Pertanyaan tersebut dapat dijawab jika Anda menguasai konsep gelombang dengan baik. Pelajarilah bab ini dengan saksama karena di dalam bab ini Anda akan mempelajari gelombang secara umum.

- A. Istilah-Istilah pada Gelombang**
- B. Gelombang Transversal dan Longitudinal**
- C. Gelombang Berjalan**
- D. Gelombang Stasioner**
- E. Energi dan Intensitas Gelombang**
- F. Sifat-Sifat Umum Gelombang**

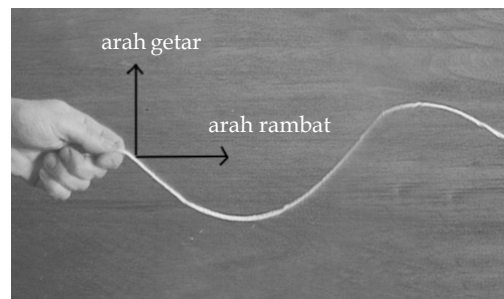
Soal Pramateri

1. Apakah yang Anda ketahui tentang getaran?
2. Adakah hubungan antara getaran dan gelombang? Jelaskan pendapat Anda.
3. Sebutkanlah contoh-contoh gelombang yang Anda ketahui dalam kehidupan sehari-hari.

A Istilah-Istilah pada Gelombang

Ketika sebuah tali yang terbentang di atas meja atau di lantai Anda gerakkan naik-turun pada salah satu ujungnya, gelombang akan merambat pada tali tersebut. Demikian pula ketika Anda melemparkan sebuah batu pada permukaan air kolam, gelombang lingkaran akan terbentuk dan merambat ke tepi kolam. Gelombang pada tali dan gelombang air merupakan dua contoh umum dari *gelombang mekanik*, yaitu gelombang yang perambatannya memerlukan medium, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.1**. Selain kedua contoh tersebut, banyak lagi contoh gerak gelombang di sekitar kehidupan, misalnya gelombang radio dan gelombang televisi yang termasuk *gelombang elektromagnetik*, yaitu gelombang yang perambatannya tidak memerlukan medium.

Gelombang merupakan proses merambatnya suatu getaran yang tidak disertai dengan perpindahan medium perantaranya, tetapi hanya memindahkan energi. Sepintas, ketika Anda membayangkan gerak gelombang, partikel-partikel yang dilalui gelombang akan turut bergerak searah gerak gelombang. Kenyataannya, tidak demikian. Partikel-partikel yang dilalui gelombang hanya akan bergerak naik-turun di sekitar titik setimbangnya. Jadi, gelombang tidak memindahkan partikel yang dilaluinya, melainkan memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lain.



(a)



(b)

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Sumber: www.rit.edu

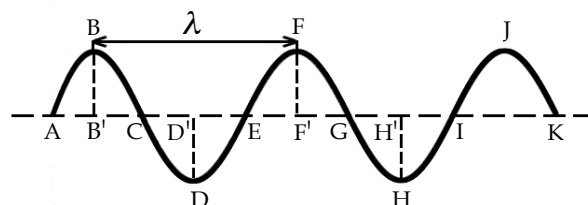
Gambar 1.1

Gerak gelombang pada (a) tali dan (b) air.

Beberapa istilah pada gelombang mirip dengan istilah-istilah pada getaran, seperti simpangan, amplitudo, frekuensi, dan periode. Berikut adalah penjelasan istilah-istilah penting yang berkaitan dengan gerak gelombang.

1. Panjang Gelombang

Satu gelombang pada tali didefinisikan terdiri atas satu puncak dan satu lembah. Panjang satu puncak dan satu lembah disebut *panjang gelombang*. Deskripsi grafis mengenai panjang, puncak, dan lembah gelombang ditunjukkan pada **Gambar 1.2**. Panjang gelombang diwakili oleh jarak antara titik A dan E atau jarak antara titik B dan F (dua puncak yang berdekatan) atau jarak antara titik C dan G (dua lembah yang berdekatan). Sementara itu, lengkungan ABC atau EFG disebut puncak gelombang dan lengkungan CDE atau GHI disebut lembah gelombang.



Gambar 1.2

Deskripsi grafis panjang, puncak, dan lembah gelombang.

2. Periode dan Frekuensi Gelombang

Periode gelombang adalah waktu yang diperlukan untuk menempuh satu panjang gelombang. *Frekuensi gelombang* adalah jumlah gelombang yang melewati suatu titik setiap sekon. Hubungan antara frekuensi dan periode gelombang dinyatakan sebagai berikut.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-1)$$

dengan: f = frekuensi (Hz), dan
 T = periode (s).

3. Cepat Rambat Gelombang

Cepat rambat gelombang adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu sekon. Pada gelombang, dalam periode T , jarak tempuhnya sama dengan panjang gelombangnya (λ) sehingga cepat rambat gelombangnya memenuhi persamaan berikut.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} \quad \text{atau} \quad v = \lambda f \quad (1-2)$$

dengan: v = cepat rambat gelombang (m/s), dan
 λ = panjang gelombang (m).

Contoh 1.1

Seorang nelayan bernama Iskandar mencatat bahwa puncak gelombang air laut melewati bagian bawah perahunya setiap 3 s. Iskandar mengukur bahwa jarak antara dua puncak gelombang yang berdekatan adalah 9 m. Berapakah cepat rambat gelombang air laut tersebut?

Jawab

Jarak antara dua puncak yang berdekatan adalah panjang gelombang dan waktu yang diperlukan untuk menempuhnya adalah periode. Dengan demikian, pada soal tersebut diketahui $\lambda = 9$ m dan $T = 3$ s sehingga sesuai **Persamaan (1-2)**, cepat rambat gelombangnya adalah

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{9 \text{ m}}{3 \text{ s}} = 3 \text{ m/s.}$$

Contoh 1.2

Sebuah batu dijatuhkan ke dalam air sehingga pada permukaan air timbul lingkaran gelombang yang berjalan. Jika lingkaran pertama menempuh jarak 5 meter selama 2 sekon dan sepanjang itu terdapat 20 gelombang, tentukanlah:

- cepat rambat gelombang,
- frekuensi gelombang,
- periode gelombang, dan
- panjang gelombang.

Jawab

Diketahui: Jarak $\Delta s = 5$ meter, waktu $\Delta t = 2$ sekon, dan jumlah gelombang $n = 20$.

- Cepat rambat gelombang

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{5 \text{ m}}{2 \text{ s}} = 2,5 \text{ m/s.}$$

Kata Kunci

- Cepat rambat gelombang
- Frekuensi gelombang
- Gelombang elektromagnetik
- Gelombang mekanik
- Panjang gelombang
- Periode gelombang

Loncatan Kuantum



Sumber: Science Encyclopedia, 2000

Tsunami adalah ombak raksasa yang bergerak perlahan dan secara cepat dapat meningkat ketinggiannya ketika memasuki perairan yang dangkal.

Quantum Leap

Tsunami are giant waves that slow down and rapidly increase in height as they enter shallow water.

Sumber: Science Encyclopedia, 2000

- b. Frekuensi gelombang adalah banyaknya gelombang setiap sekon sehingga

$$f = \frac{n}{t} = \frac{20}{2\text{s}} = 10\text{Hz}$$

- c. Periode gelombang

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10\text{Hz}} = 0,1\text{sekon}$$

- d. Panjang gelombang

$$\lambda = vT = (2,5\text{ m/s})(0,1\text{s}) = 0,25\text{ m}$$

Panjang gelombang dapat juga dicari sebagai berikut.

Oleh karena dalam jarak 5 meter terdapat 20 gelombang maka

$$\lambda = \frac{\Delta s}{n} = \frac{5\text{m}}{20} = 0,25\text{ m}$$

Kecepatan rambat gelombang bergantung pada karakteristik medium yang dilaluinya. Sebagai contoh, kecepatan gelombang pada tali bergantung pada gaya tegangan tali (F_T) dan massa per satuan panjang tali, yaitu $\mu = \frac{m}{L}$. Untuk amplitudo kecil, hubungannya diberikan oleh persamaan berikut.

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{F_T L}{m}} \quad (1-3)$$

Contoh 1.3

Tali yang panjangnya 5 m dan bertegangan 2 N digetarkan sehingga membentuk gelombang. Jika massa tali $6,25 \times 10^{-3}$ kg, tentukan cepat rambat gelombangnya.

Jawab

Diketahui: $L = 5\text{ m}$, $F_T = 2\text{ N}$, dan $m = 6,25 \times 10^{-3}\text{ kg}$. Massa persatuan panjangnya

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{6,25 \times 10^{-3}\text{ kg}}{5\text{ m}} = 1,25 \times 10^{-3}\text{ kg/m}.$$

sehingga kecepatan rambat gelombang pada tali adalah

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{2\text{ N}}{1,25 \times 10^{-3}\text{ kg/m}}} = \sqrt{1.600} = 40\text{ m/s}.$$

Kata Kunci

- Amplitudo gelombang
- Simpangan gelombang

4. Simpangan dan Amplitudo Gelombang

Simpangan gelombang adalah jarak partikel yang dilalui gelombang ke titik setimbang. *Amplitudo* adalah simpangan maksimum. Pada **Gambar 1.2**, amplitudo diwakili oleh panjang BB' , DD' , atau FF' .

Soal Penguasaan Materi 1.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Pada permukaan suatu danau terdapat dua buah gabus yang terpisah satu dari lainnya sejauh 60 cm. Keduanya turun naik di atas permukaan air dengan frekuensi 2 getaran per sekon. Salah satu gabus berada

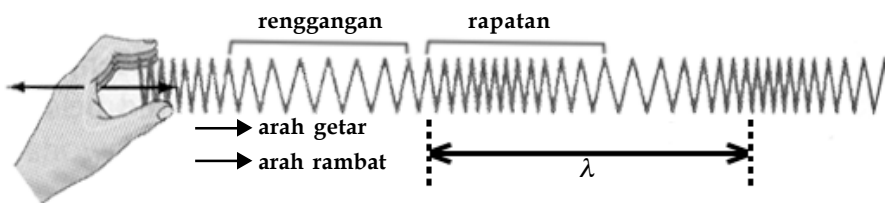
di puncak bukit gelombang, yang lainnya berada di lembah gelombang, sedangkan di antara kedua gabus itu terdapat satu bukit gelombang. Tentukan cepat rambat gelombang pada permukaan danau tersebut.

2. Gelombang air laut menyebabkan permukaan air naik turun dengan periode 2 sekon. Jika jarak antardua puncak gelombang 5 meter, berapa lama waktu yang diperlukan gelombang untuk mencapai jarak 10 meter?
3. Gelombang transversal merambat dari A ke B dengan cepat rambat 12 m/s pada frekuensi 4 Hz dan amplitudo 5 cm. Jika jarak AB = 18 m, tentukan banyaknya gelombang yang terjadi sepanjang AB.
4. Kawat untuk saluran transmisi listrik yang massanya 40 kg diikat di antara dua menara tegangan tinggi yang jaraknya 200 m. Salah satu ujung kawat dipukul oleh teknisi yang berada di salah satu menara sehingga timbul gelombang yang merambat ke menara yang lain. Jika gelombang pantul terdeteksi setelah 10 sekon, berapakah gaya tegangan kawat?

B Gelombang Transversal dan Longitudinal

Ketika gelombang merambat pada tali, partikel-partikel pada tali bergetar naik-turun dalam arah yang tegak lurus dengan arah gerak gelombang itu sendiri, seperti telah diilustrasikan pada **Gambar 1.1**. Gelombang seperti ini disebut *gelombang transversal*.

Selain gelombang transversal, ada juga *gelombang longitudinal*. Pada gelombang longitudinal, partikel-partikel medium yang dilalui gelombang bergetar dalam arah yang sejajar dengan arah rambatnya. Ketika sebuah slinki (kumparan pegas yang terbuat dari logam pipih) digetarkan sejajar panjangnya pada salah satu ujungnya, getaran itu akan dirambatkan di sepanjang slinki sehingga timbul rapatan dan renggangan, seperti diilustrasikan pada **Gambar 1.3**. Gelombang bunyi juga termasuk gelombang longitudinal. Ketika sebuah sumber bunyi bergetar, rambatan bunyi menyebabkan udara yang dilaluinya membentuk rapatan dan renggangan.



Sumber: *Physics for Scientists and Engineers With Modern Physics*, 2000

Seperti pada gelombang transversal, pada gelombang longitudinal pun terdapat beberapa istilah, seperti panjang gelombang, frekuensi, dan cepat rambat gelombang. Dalam hal ini, *panjang gelombang* didefinisikan sebagai panjang satu rapatan ditambah satu renggangan. *Frekuensi gelombang* adalah jumlah rapatan atau jumlah renggangan yang melewati suatu titik tiap sekon. Adapun *cepat rambat gelombang* sama dengan hasil kali panjang gelombang dan frekuensi gelombang.

Kecepatan rambat gelombang longitudinal bergantung pada medium yang dilaluinya. Pada zat padat, kecepatan rambat gelombang transversal dinyatakan oleh

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-4)$$

dengan: E = modulus elastisitas zat padat (Nm^2), dan
 ρ = massa jenis zat padat (kgm^3).

Kata Kunci

- Gelombang longitudinal
- Gelombang transversal

Gambar 1.3

Gelombang longitudinal pada sebuah slinki.

Jangan Lupa

Modulus elastisitas (modulus Young) merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan suatu benda.

$$E = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = \frac{\left[\frac{F}{A}\right]}{\left[\frac{\Delta L}{L}\right]}$$

dengan:

- F = gaya (N),
- A = luas penampang (m^2),
- ΔL = perubahan panjang (m), dan
- L = panjang benda (m).

Jangan Lupa

Modulus Bulk merupakan perbandingan antara perubahan tekanan dan fraksi perubahan volume suatu zat cair atau gas.

$$B = \frac{\text{perubahan tekan}}{\text{fraksi perubahan volume}} = \frac{\Delta P}{\left[\frac{\Delta V}{V}\right]}$$

dengan:

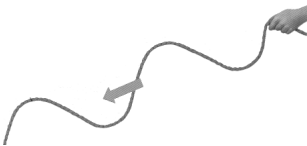
ΔP = perubahan tekanan (N/m^2),

ΔV = perubahan volume (m^3), dan

V = volume zat (m^3).

Jelajah Fisika

Gelombang Transversal



Gelombang yang menuruni seutas tali merupakan salah satu contoh gelombang transversal. Ketika salah satu ujung seutas tali digerakkan ke atas maka setiap partikel di dalam tali secara bergiliran ditarik ke atas atau ke bawah oleh gerakan partikel sebelumnya. Pada gelombang memanjang, partikel-partikel saling membentur di sepanjang arah Bergeraknya gelombang.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Sementara itu, cepat rambat gelombang longitudinal pada zat cair atau gas adalah

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

(1-5)

dengan: B = modulus Bulk zat cair atau gas (Nm^2), dan
 ρ = massa jenis zat cair atau gas (kgm^3).

Contoh 1.4

Diketahui massa jenis air dan baja masing-masing 1.000 kg/m^3 dan 7.800 kg/m^3 , modulus Bulk air $2,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, dan modulus elastisitas baja $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$. Hitung cepat rambat bunyi pada

- air, dan
- baja.

Jawab

- Diketahui: $\rho_a = 1.000 \text{ kg/m}^3$ dan $B = 2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

Cepat rambat bunyi dalam air adalah

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^9}{1.000 \text{ kg/m}^2}} = 1.414 \text{ m/s.}$$

- Diketahui: $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ dan $\rho_b = 7.800 \text{ kg/m}^3$.

Cepat rambat bunyi pada baja adalah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho_b}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2}{7.800 \text{ kg/m}^3}} = 5.064 \text{ m/s.}$$

Contoh 1.5

Bunyi merambat pada besi yang memiliki modulus elastisitas 10^{11} N/m^2 dan massa jenis 7.600 kg/m^3 . Jika frekuensi bunyi 5.000 Hz , berapa panjang gelombangnya?

Jawab

Diketahui: $E = 10^{11} \text{ N/m}^2$, $\rho = 7.800 \text{ kg/m}^3$, dan $f = 5.000 \text{ Hz}$.

Cepat rambat bunyi pada besi adalah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{10^{11} \text{ N/m}^2}{7.800 \text{ kg/m}^3}} = 3.581 \text{ m/s.}$$

Dengan demikian, panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3.581 \text{ m/s}}{5.000 \text{ Hz}} = 0,72 \text{ m.}$$

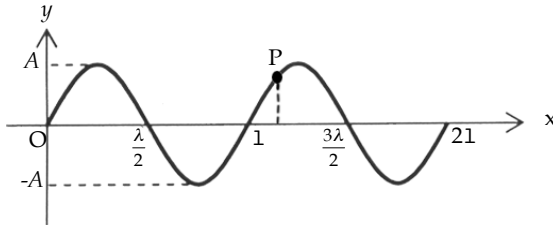
Soal Penguasaan Materi 1.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Gelombang bunyi di udara memiliki frekuensi sebesar 8.500 Hz dan merambat dengan kecepatan 340 m/s . Berapa jauh jarak antara titik tengah dua rapatan yang berdekatan?
- Dua buah benda padat memiliki modulus elastisitas sama, tapi berbeda massa jenisnya. Benda padat yang manakah yang memiliki cepat rambat gelombang longitudinal lebih besar dan apa faktor penyebabnya?
- Diketahui modulus elastisitas dan massa jenis granit $4,5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ dan $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.
 - Tentukan cepat rambat bunyi dalam granit.
 - Jika frekuensi bunyi tersebut 2.000 Hz , berapa panjang gelombangnya?

C Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan adalah gelombang yang bergerak dengan amplitudo tetap. Grafik simpangan terhadap jarak tempuh suatu gelombang ditunjukkan pada **Gambar 1.4**.



Untuk menentukan simpangan gelombang di suatu titik, tinjau titik P pada **Gambar 1.4**. Misalnya, gelombang merambat dengan kecepatan v searah sumbu- x positif. Waktu yang diperlukan gelombang untuk merambat dari titik O ke titik P adalah $\Delta t = \frac{x}{v}$ sehingga ketika titik O telah bergetar t sekon, titik P baru bergetar selama $t_p = t_O - \Delta t$ atau $t_p = t - \frac{x}{v}$. Dari persamaan getaran ($y = A \sin \omega t$), simpangan titik P pada saat titik O telah bergetar t sekon adalah

$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin \left(\omega t - \frac{\omega}{v} x \right)$$

atau

$$y = A \sin (\omega t - kx) \quad (1-6)$$

dengan: y = simpangan di titik P (m atau cm),

A = amplitudo atau simpangan maksimum (m atau cm),

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ = frekuensi sudut (rad/s),

T = periode(s),

x = posisi titik P dari sumber getaran/titik O (dalam m atau cm),

t = waktu (s), dan

$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ = bilangan gelombang (m^{-1}).

Persamaan (1-6) berlaku jika pada $t = 0$, titik O berada di titik setimbang. Jika pada $t = 0$ titik O berada pada simpangan tertentu dari titik setimbangnya, **Persamaan (1-6)** dapat ditulis menjadi

$$y = A \sin (kx - \omega t + \theta_0) \quad (1-7)$$

dengan θ_0 = sudut fase awal gelombang (rad).

Besaran yang berada dalam kurung pada **Persamaan (1-7)** disebut *sudut fase gelombang* yang dinyatakan dalam satuan rad (radian). Secara matematis, sudut fase ditulis

$$\theta = 2\pi\varphi = kx - \omega t + \theta_0 \quad (1-8)$$

dengan φ = fase gelombang (tidak bersatuan).

Gambar 1.4

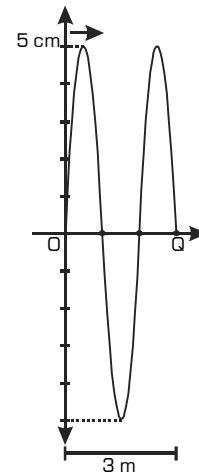
Gelombang berjalan memiliki amplitudo tetap.

Solusi

Cerdas ■

Sebuah titik gelombang merambat dari titik O ke titik Q dengan cepat rambat 4 m/s, frekuensi 2 Hz, amplitudo 5 cm, sedangkan jarak OQ 3 m. Simpangan titik Q saat O telah bergetar 1,5 s adalah

- 0 cm
- $2,5\sqrt{2}$ cm
- $2,5\sqrt{3}$ cm
- 2,5 cm
- 5 cm



Penyelesaian

Sebuah gelombang diketahui: $v = 4 \text{ m/s}$, $f = 2 \text{ Hz}$, dan $A = 5 \text{ cm}$

$$y = A \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

Simpangan titik Q setelah titik O bergetar 1,5 s adalah

$$\begin{aligned} y &= 5 \sin 2\pi (2) \left(1,5 - \frac{3}{4} \right) \\ &= 5 \sin 3\pi \\ &= 5 \sin \pi \\ &= 0 \text{ cm} \end{aligned}$$

Jawab : a

UAN 2002/2003

Kata Kunci

- Fase gelombang
- Gelombang berjalan
- Sudut fase gelombang

Dari **Persamaan (1-8)**, beda fase antara dua titik pada waktu yang sama memenuhi persamaan

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (1-9)$$

dengan Δx = jarak antara dua titik (m).

Dua titik pada gelombang dikatakan *sefase* apabila jarak antara dua titik merupakan kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombangnya, yakni

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1-10)$$

Sebaliknya, dua titik pada gelombang dikatakan *berlawanan fase* apabila jarak antara dua titik merupakan bilangan ganjil kali setengah panjang gelombang, yakni

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \quad (1-11)$$

Contoh 1.6

Persamaan gelombang transversal yang merambat sepanjang tali yang sangat panjang adalah $y = 6 \sin (0,02\pi x + 4\pi t)$ dengan y dan x dalam cm dan t dalam sekon. Tentukan:

- amplitudo gelombang,
- panjang gelombang,
- frekuensi gelombang, dan
- arah perambatan gelombang.

Jawab

Bandingkan persamaan gelombang di atas dengan persamaan gelombang umum pada **Persamaan (1-7)**.

$$y = 6 \sin (0,02\pi x + 4\pi t) \Leftrightarrow y = A \sin (kx + \omega t + \theta_0)$$

Dengan demikian, diperoleh

- Amplitudo gelombang, $A = 6$ cm.
- Bilangan gelombang, $k = 0,02\pi$ rad/m sehingga panjang gelombangnya

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{0,02\pi} = 100 \text{ cm.}$$

- Frekuensi sudut, $\omega = 4\pi$ rad/s sehingga frekuensi gelombangnya

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{4\pi}{2\pi} = 2 \text{ Hz.}$$

- Oleh karena koefisien x dan t pada persamaan gelombang bertanda sama (positif), gelombang merambat ke arah sumbu- x negatif.

Contoh 1.7

Gelombang merambat dari titik A ke titik B dengan amplitudo 10^{-2} m dan periode 0,2 sekon. Jarak AB = 0,3 m. Jika cepat rambat gelombang 2,5 m/s, tentukan beda fase antara titik A dan B pada suatu saat tertentu.

Jawab

Diketahui: $A = 10^{-2}$ m, $T = 0,2$ sekon, Δx = jarak AB = 0,3 m, dan $v = 2,5$ m/s.

Panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = v T = (2,5 \text{ m/s})(0,2 \text{ s}) = 0,5 \text{ m}$$

sehingga diperoleh beda fase

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{0,3\text{ m}}{0,5\text{ m}} = \frac{3}{5}$$

dan beda sudut fase

$$\Delta\theta = 2\pi\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{3}{5}\right) = \frac{6\pi}{5} \text{ rad/s.}$$

Soal Penguasaan Materi 1.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Suatu gelombang dinyatakan dengan persamaan $y = 0,20 \sin 0,40\pi (x - 60t)$. Jika semua jarak diukur dalam cm dan waktu dalam sekon, tentukan:
 - a. panjang gelombang,
 - b. frekuensi gelombang,
 - c. cepat rambat gelombang, dan
 - d. simpangan gelombang pada posisi $x = \frac{35}{12}$ cm dan saat $t = \frac{1}{24}$ sekon.
2. Suatu gelombang berjalan melalui titik A dan B yang berjarak 8 cm dalam arah dari A ke B. Pada saat $t = 0$, simpangan gelombang di A adalah 0. Jika panjang

gelombangnya 12 cm dan amplitudonya 4 cm, tentukan simpangan titik B pada saat sudut fase titik

A sebesar $\frac{3\pi}{2}$ rad.

3. Sebuah gelombang transversal merambat dengan persamaan $y = 0,20 \sin 8\pi \left(t - \frac{x}{20} + \frac{1}{16}\right)$, dengan y dan x dalam meter, t dalam sekon. Tentukan:
 - a. cepat rambat gelombang, dan
 - b. sudut fase awal sumber gelombang.

D Gelombang Stasioner

Gelombang stasioner adalah gelombang yang amplitudonya berubah terhadap posisi. Gelombang tersebut dapat terbentuk dari perpaduan atau superposisi dua gelombang yang memiliki amplitudo, panjang gelombang, dan frekuensi yang sama, tetapi arahnya berlawanan. Secara matematis, simpangan gelombangnya adalah

$$y_s = y_1 + y_2 \quad (1-12)$$

dengan: y_s = simpangan gelombang stasioner,
 y_1 = simpangan gelombang pertama, dan
 y_2 = simpangan gelombang kedua.

Untuk memahami terjadinya gelombang stasioner, tinjaulah dua buah gelombang yang bergerak dalam arah berlawanan. Kedua gelombang tersebut masing-masing dapat dinyatakan oleh $y_1 = A \sin (kx - \omega t)$ dan $y_2 = A \sin (kx + \omega t)$. Hasil superposisi kedua gelombang tersebut sebagai berikut.

$$y_s = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)] \quad (1-13)$$

Dari trigonometri, dinyatakan bahwa

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \quad (1-14)$$

Dengan mengganti $\alpha = kx - \omega t$ dan $\beta = kx + \omega t$ pada **Persamaan (1-14)** dan memasukkan hasilnya ke **Persamaan (1-13)** diperoleh

$$y_s = [2A \sin(kx)] \cos(-\omega t) = A_s \cos(-\omega t) \quad (1-15)$$

dengan

$$A_s = 2A \sin(kx) \quad (1-16)$$

Kata Kunci

- Gelombang stasioner
- Superposisi gelombang
- Simpangan gelombang stasioner

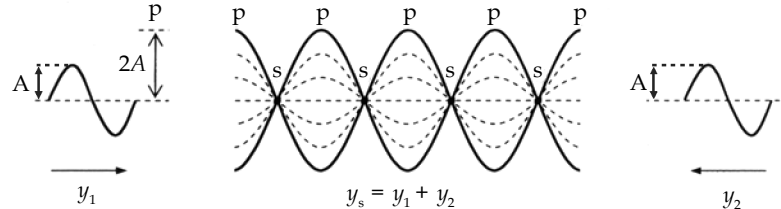
Jangan Lupa

Trigonometri merupakan ilmu ukur yang mempelajari sudut yang terdiri atas sinus (sin), cosinus (cos), tangen (tan), cotangen (cotan), secan (sec), dan cosecan (cosec). **Persamaan (1-14)** merupakan salah satu rumus penjumlahan yang ada di dalam trigonometri.

A_s adalah amplitudo gelombang perpaduan/resultan. Dari **Persamaan (1-16)** terlihat bahwa amplitudo resultan bergantung pada posisi (x), memiliki nilai maksimum $2A$ (terjadi jika $\sin kx = 1$), nilai minimum nol (terjadi jika $\sin kx = 0$), dan tidak bergantung pada waktu.

Ilustrasi grafis gelombang stasioner diperlihatkan pada **Gambar 1.5**. Pada gelombang stasioner, partikel-partikel yang dilalui gelombang bergetar naik-turun dengan amplitudo berbeda, bergantung pada posisinya. Titik-titik yang memiliki amplitudo maksimum disebut titik-titik perut (P) dan titik-titik yang memiliki amplitudo nol disebut titik simpul (S).

Gambar 1.5
Contoh pembentukan gelombang stasioner.



Gambar 1.5 juga memperlihatkan bahwa jarak antara dua titik perut yang berdekatan (x_{pp}) sama dengan jarak dua simpul yang berdekatan (x_{ss}) dan memenuhi hubungan

$$x_{pp} = x_{ss} = \frac{1}{2} \lambda \quad (1-17)$$

Sementara itu, jarak antara titik simpul dan titik perut (x_{ps}) memenuhi

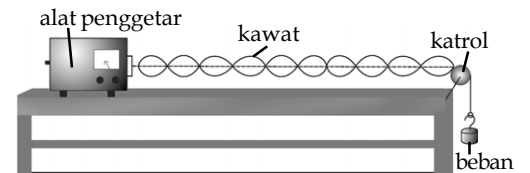
$$x_{ps} = \frac{1}{4} \lambda \quad (1-18)$$

Mahir Meneliti 1.1

Mengamati Gelombang Stasioner

Alat dan Bahan

1. Alat penggetar (*vibrator*)
2. Seutas kawat dan beberapa beban
3. Meja yang dilengkapi dengan katrol

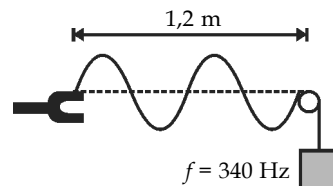


Prosedur

1. Siapkan alat dan bahan, kemudian susunlah seperti gambar di atas.
2. Hidupkan alat penggetar sehingga gelombang pada kawat merambat dari penggetar ke katrol.
3. Ketika gelombang sampai di katrol, gelombang akan dipantulkan kembali ke alat penggetar sehingga akan terjadi interferensi antara gelombang datang dan gelombang pantul.
4. Apabila tidak terjadi gelombang stasioner pada kawat, ubahlah frekuensi penggetar atau dengan cara mengatur berat beban (menambah atau mengurangi beban).
5. Diskusikan hasil percobaan yang Anda lakukan, kemudian ambil kesimpulannya.
6. Presentasikan hasil percobaan yang telah Anda lakukan.

Contoh 1.8

Perhatikan gambar garputala berikut.



Jika garputala digetarkan, pada dawai terjadi gelombang stasioner. Tentukanlah cepat rambat gelombang pada dawai.

Jawab

Pada tali sepanjang 1,2 m terbentuk 2 gelombang (lihat gambar) maka panjang gelombangnya

$$\lambda = \frac{1,2 \text{ m}}{2} = 0,6 \text{ m}$$

sehingga cepat rambatnya

$$v = \lambda f = (0,6 \text{ m})(340 \text{ Hz}) = 204 \text{ m/s.}$$

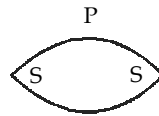
Contoh 1.9

Dawai sepanjang 1 m diberi tegangan 100 N. Pada saat dawai digetarkan dengan frekuensi 500 Hz, di sepanjang dawai terbentuk 10 perut. Tentukan massa dawai.

Jawab

Diketahui: $L = 1 \text{ m}$, $F_T = 100 \text{ N}$, $f = 500 \text{ Hz}$, dan jumlah perut $P = 10$. Perhatikan gambar gelombang stasioner pada dawai di samping.

Untuk satu perut P terbentuk pola $\frac{1}{2}\lambda$. Berarti, jika terbentuk 10 perut, pola gelombang yang terjadi adalah $10 \times \left(\frac{1}{2}\lambda\right) = 5\lambda$. Oleh karena panjang dawai 1 m maka



$$5\lambda = 1 \rightarrow \lambda = \frac{1}{5} \text{ m.}$$

Cepat rambat gelombang dalam dawai adalah

$$v = \lambda f = \left(\frac{1}{5} \text{ m}\right)(500 \text{ Hz}) = 100 \text{ m/s.}$$

Dengan mengkuadratkan **Persamaan (1-3)**, yaitu $v^2 = \frac{F_T}{\mu}$, diperoleh

$$\mu = \frac{F_T}{v^2} = \frac{100 \text{ N}}{(100 \text{ m/s})^2} = 10^{-2} \text{ kg/m}$$

sehingga diperoleh

$$m = \mu L = (10^{-2} \text{ kg/m})(1 \text{ m}) = 10^{-2} \text{ kg} = 10 \text{ gram.}$$

Soal Penguasaan Materi 1.4

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Dua buah gelombang masing-masing dengan amplitudo 4 cm dan panjang gelombang 20 cm bergerak dalam arah berlawanan dan bersuperposisi sehingga diperoleh gelombang stasioner. Tentukan:
 - amplitudo maksimum gelombang stasioner,
 - jarak antara titik simpul dan titik perut yang berdekatan, dan
 - jarak antara dua titik simpul yang berdekatan.
- Dua buah gelombang masing-masing memenuhi persamaan $y_1 = 4 \sin 2\pi(x - 3t)$ dan $y_2 = 4 \sin 2\pi(x - 3t)$ bersuperposisi. Jika x dalam meter dan t dalam sekon, tentukan:
 - amplitudo gelombang hasil superposisinya pada $x = 0,5 \text{ m}$, dan
 - jarak antara dua titik simpul yang berdekatan.

Kata Kunci

- Energi gelombang
- Intensitas gelombang

Jelajah Fisika

Energi Gelombang



Sumber: Ensiklopedi Pelajar, 2000

Energi tidak hanya dapat berubah bentuk, tetapi dapat berpindah dari suatu tempat ke tempat yang lain. Hal ini terjadi melalui gerakan gelombang, misalnya ombak laut. Energi besar dari ombak laut yang besar berasal dari angin yang bertiup melintasi laut. Para peselancar menggunakan energi tersebut untuk mempercepat dan mengemudikan papan selancarnya.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

E Energi dan Intensitas Gelombang

Ketika gelombang merambat pada suatu medium, gelombang tersebut memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lainnya. Energi yang dipindahkan berupa energi getaran dari satu partikel ke partikel lain dalam medium yang dilaluinya. Untuk gelombang sinusoida dengan amplitudo A dan frekuensi sudut ω , setiap partikel memiliki energi sebesar

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (1-19)$$

Persamaan (1-19) menunjukkan bahwa energi gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudo. Semakin besar amplitudonya, semakin besar pula energi gelombangnya.

Energi yang dipindahkan gelombang tiap satuan luas tiap satuan waktu disebut *intensitas gelombang*. Oleh karena energi per satuan waktu adalah daya, intensitas gelombang juga sama dengan daya dibagi luas. Untuk gelombang yang menyebar ke segala arah, intensitasnya pada suatu jarak R dari sumber memenuhi persamaan berikut.

$$I = \frac{\text{daya}}{\text{luas}} = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (1-20)$$

Contoh 1.10

Intensitas gelombang yang dihasilkan gempa Bumi pada jarak 100 km dari hiposentrum adalah $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$. Berapakah intensitas gelombang tersebut pada jarak 400 km dari hiposentrum?

Jawab

Jarak 400 km sama dengan 4 kali jarak 100 km sehingga *kuadrat jaraknya* menjadi 16 kali semula. **Persamaan (1-20)** menunjukkan bahwa intensitas (I) berbanding

terbalik dengan kuadrat jarak (R^2). Dengan demikian, intensitasnya menjadi $\frac{1}{16}$ kali semula atau

$$I_2 = \frac{1}{16} I_1 = \left(\frac{1}{16} \right) (1 \times 10^6 \text{ W/m}^2) = 6,25 \times 10^4 \text{ W/m}^2.$$

Soal Penguasaan Materi 1.5

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

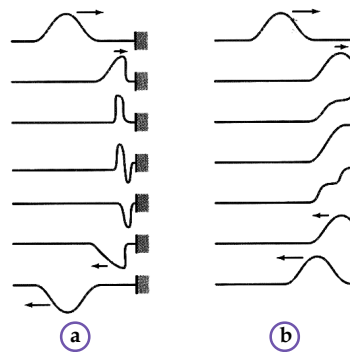
1. Dua gelombang dengan frekuensi sama merambat dalam suatu medium. Jika gelombang pertama membawa energi dua kali gelombang kedua, berapakah perbandingan amplitudo kedua gelombang itu?
2. Sebuah perahu bergerak naik turun dihempas gelombang air laut. Jarak perahu ketika berada di puncak dan ketika berada di lembah adalah 6 m. Jika jarak vertikal puncak dan lembahnya berkurang menjadi 4 m, berapa persen perubahan energi kinetik maksimum perahu?

F Sifat-Sifat Umum Gelombang

1. Pemantulan

Pernahkah Anda berteriak di suatu lembah? Ketika Anda melakukannya, Anda akan mendengar kembali teriakan Anda beberapa saat setelah Anda selesai berteriak. Demikian pula ketika gelombang laut membentur batu karang, gelombang tersebut akan berbalik ke arah datangnya. Fenomena ini menunjukkan bahwa gelombang mengalami *pemantulan (refleksi)*.

Sekarang, tinjau sebuah tali yang salah satu ujungnya terikat, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.6(a)**. Ketika ujung bebannya digetarkan satu kali, pulsa gelombang akan merambat di sepanjang tali. Ketika pulsa tersebut tiba di ujung tali lainnya, pulsa tersebut akan memberikan gaya (aksi) pada pengikatnya. Sesuai dengan Hukum Ketiga Newton (Hukum Aksi-Reaksi) pengikat akan memberikan gaya reaksi pada tali dengan arah berlawanan gaya aksi. Gaya reaksi inilah yang menyebabkan terbentuknya pulsa pantul yang terbalik (berlawanan fase dengan pulsa datang).



Kata Kunci

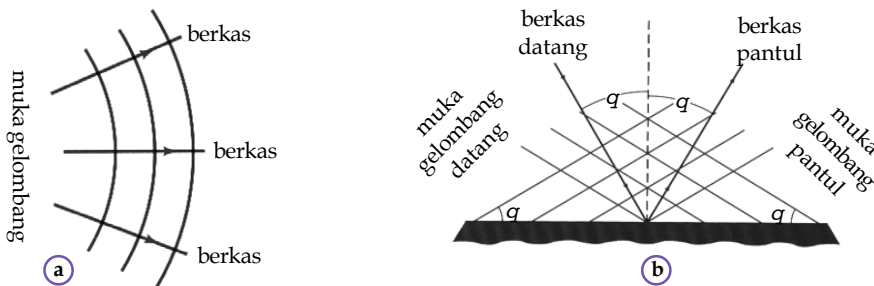
- Berkas gelombang
- Muka gelombang
- Pemantulan gelombang
- Sudut datang
- Sudut bias

Gambar 1.6

Pemantulan gelombang tali pada:
(a) ujung terikat, dan
(b) ujung bebas.

Pemantulan juga dapat terjadi meskipun ujung tali bebas (tidak terikat). Akan tetapi, pulsa pantulnya sefase dengan pulsa datangnya, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.6(b)**. Bagaimanakah pemantulan pada gelombang air? Gelombang air merupakan contoh gelombang dalam dua dimensi karena gelombangnya merambat ke segala arah dalam bidang.

Puncak-puncak gelombangnya akan membentuk lingkaran dengan pusat terletak pada sumber gelombang. Lebar puncak gelombang ini disebut *muka gelombang*. Garis yang digambarkan searah gerak gelombang dan tegak lurus muka gelombang disebut *berkas*, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.7(a)**.



Gambar 1.7

(a) Muka gelombang dan berkas pada gelombang air.
(b) Hukum Pemantulan Gelombang

Ketika muka gelombang mengenai bidang, muka gelombang tersebut akan mengalami pemantulan. Apabila berkas datang membentuk sudut θ terhadap garis normal (garis yang tegak lurus bidang pantul), berkas pantul pun akan membentuk sudut θ terhadap garis normal, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.7(b)**. Gejala ini dikenal sebagai Hukum Pemantulan Gelombang, yaitu *sudut pantul sama dengan sudut datang*.

2. Pembiasan Gelombang

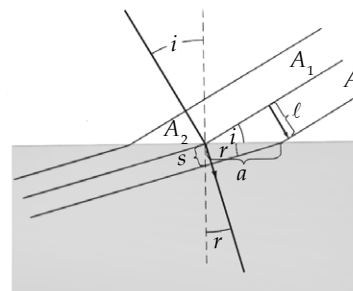
Pembiasan gelombang (refraksi) adalah pembelokan arah muka gelombang ketika masuk dari satu medium ke medium lainnya. Pembiasan dan pemantulan terjadi secara bersamaan. Dengan kata lain, ketika gelombang datang mengenai medium lain, sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lainnya akan diteruskan atau dibiaskan. Pembiasan terjadi karena gelombang memiliki kelajuan berbeda pada medium berbeda.

Gambar 1.8

- (a) Contoh pembiasan.
(b) Skema pembiasan gelombang.



(a)



(b)

Sumber: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

Gambar 1.8(a) memperlihatkan contoh peristiwa pembiasan, sedangkan **Gambar 1.8(b)** memperlihatkan berkas gelombang ketika pembiasan terjadi. Sudut antara berkas datang dan garis normal (i) disebut *sudut datang*. Sementara itu, sudut antara berkas bias dan garis normal (r) disebut *sudut bias*. Hubungan antara sudut datang dan sudut bias sebagai berikut. Pada **Gambar 1.8(b)**, tinjaulah muka gelombang A . Ketika A_2 tiba di permukaan batas dua medium, A_1 masih di medium pertama. Dalam selang waktu t , A_2 menempuh jarak s pada medium kedua, sedangkan A_1 menempuh jarak ℓ pada medium pertama. Dari dua segitiga dengan salah satu sisi yang sama, yakni a , diperoleh

$$\sin i = \frac{\ell}{a} = \frac{v_1 t}{a} \quad \text{dan} \quad \sin r = \frac{s}{a} = \frac{v_2 t}{a}$$

sehingga dengan membandingkan dua persamaan tersebut, diperoleh

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-21)$$

dengan: i = sudut datang,

r = sudut bias,

v_1 = cepat rambat gelombang pada medium pertama, dan

v_2 = cepat rambat gelombang pada medium kedua.

Persamaan (1-21) disebut Hukum Pembiasan.

Contoh 1.11

Berkas gelombang datang pada permukaan suatu medium dengan sudut datang 53° . Akibatnya, kecepatan gelombang tersebut menurun dari 8 m/s menjadi 5 m/s. Berapakah sudut bias berkas gelombang tersebut?

Jawab

Diketahui: $i = 53^\circ$, $v_1 = 8$ m/s, dan $v_2 = 5$ m/s. Sesuai dengan **Persamaan (1-21)**,

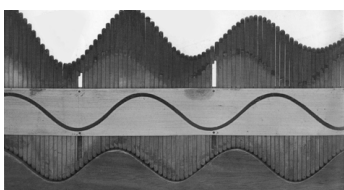
$$\frac{\sin 53^\circ}{\sin r} = \frac{8 \text{ m/s}}{5 \text{ m/s}}$$

maka

$$\sin r = \frac{(5 \text{ m/s})(\sin 53^\circ)}{(8 \text{ m/s})} = \frac{(5 \text{ m/s})(0,8)}{(8 \text{ m/s})} = 0,5$$

sehingga diperoleh $r = 30^\circ$.

Jelajah Fisika



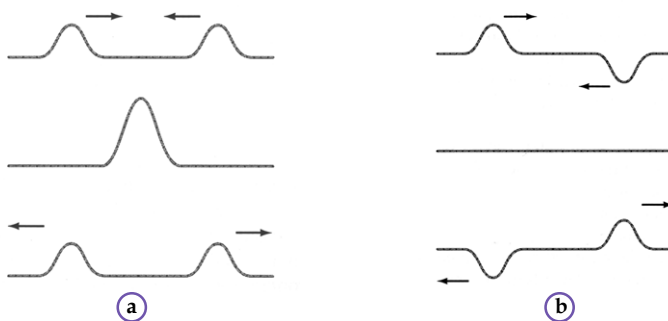
Pada abad ke-18, dibuat suatu alat untuk menunjukkan efek interferensi gelombang. Alat ini terdiri atas sebaris tongkat kuningan dengan panjang yang berbeda-beda sehingga ujung-ujung atasnya membentuk gelombang. Deretan kuningan tersebut dipasang di atas lempengan kayu yang juga berbentuk gelombang sehingga ujung-ujung kuningan mengikuti kombinasi dua gelombang itu. Perpaduan dua gelombang tersebut dapat menghasilkan interferensi konstruktif dan interferensi destruktif.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

3. Interferensi

Interferensi gelombang adalah perpaduan atau superposisi gelombang ketika dua gelombang atau lebih tiba di tempat yang sama pada saat yang sama. Interferensi dua gelombang dapat menghasilkan gelombang yang amplitudonya saling menguatkan (interferensi maksimum/konstruktif) dan dapat pula menghasilkan gelombang yang saling melemahkan (interferensi minimum/destruktif).

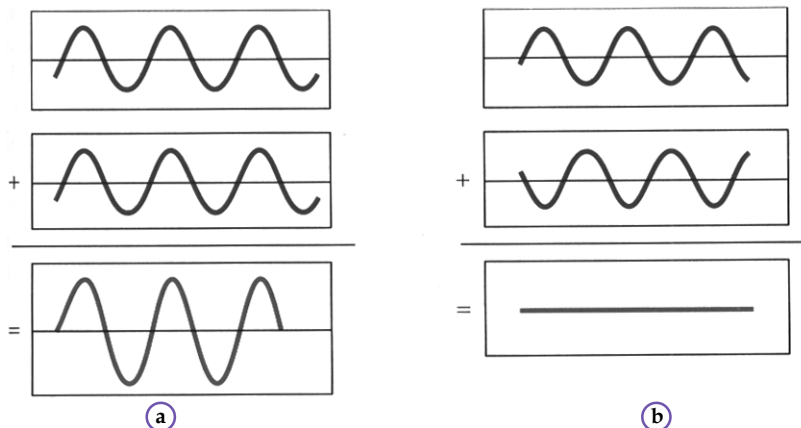
Sebagai ilustrasi, tinjaulah dua pulsa gelombang yang berjalan berlawanan arah seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.9**. Pada **Gambar 1.9(a)**, kedua pulsa berupa puncak sehingga ketika bertemu akan membentuk pulsa yang lebih besar dengan amplitudo dua kali amplitudo tiap pulsa (interferensi maksimum). Sementara itu, pada **Gambar 1.9(b)**, pulsa yang pertama berupa puncak, sedangkan pulsa kedua berupa lembah dengan amplitudo yang sama. Akibatnya, ketika puncak dan lembah ini bertemu, kedua pulsa akan saling melemahkan (interferensi minimum). Setelah melewati tempat pertemuan tadi, kedua pulsa akan melanjutkan perjalanannya kembali seperti semula.



Gambar 1.9

Interferensi dua pulsa gelombang dapat menghasilkan: (a) interferensi maksimum, dan (b) interferensi minimum.

Ilustrasi tersebut dapat diperluas untuk gelombang berjalan, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.10** berikut.



Gambar 1.10

Interferensi dua gelombang. (a) Interferensi konstruktif. (b) Interferensi destruktif.

Ketika dua gelombang bertemu dan pertemuan itu sama-sama puncak atau sama-sama lembah, interferensi maksimum terjadi. Akan tetapi, ketika puncak dan lembah yang bertemu, interferensi minimumlah yang terjadi. Ketika yang bertemu itu sama-sama puncak atau sama-sama lembah, dikatakan kedua gelombang itu *sefase*. Sebaliknya, ketika yang bertemu itu puncak dan lembah, dikatakan kedua gelombang itu berlawanan fase. Dengan kata lain, *interferensi maksimum* terjadi jika dua gelombang bertemu memiliki fase yang sama, sedangkan *interferensi minimum* terjadi jika dua gelombang yang bertemu memiliki fase yang berlawanan. Secara matematis, ungkapan ini dapat dituliskan seperti pada **Persamaan (1-22)** dan **(1-23)** sebagai berikut.

a. Interferensi maksimum

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1-22)$$

b. Interferensi minimum

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \quad (1-23)$$

Dalam hal ini, Δx = selisih jarak yang ditempuh antara kedua gelombang yang bertemu.

Kerjakanlah

Kata Kunci

- Difraksi gelombang
- Interferensi destruktif
- Interferensi gelombang
- Interferensi konstruktif
- Pembiasan gelombang (refraksi)

Sediakanlah sebuah ember transparan berisi air dan lampu belajar. Sorotlah air di dalam ember dengan lampu belajar Anda. Kemudian, letakkan jari telunjuk dan ibu jari Anda pada permukaan air secara bersamaan, seperti pada gambar di samping. Apa yang dapat Anda amati dari kegiatan tersebut? Gejala apakah yang terjadi pada permukaan air? Tulislah kesimpulan Anda, lalu diskusikan dengan teman-teman dan guru Fisika Anda.

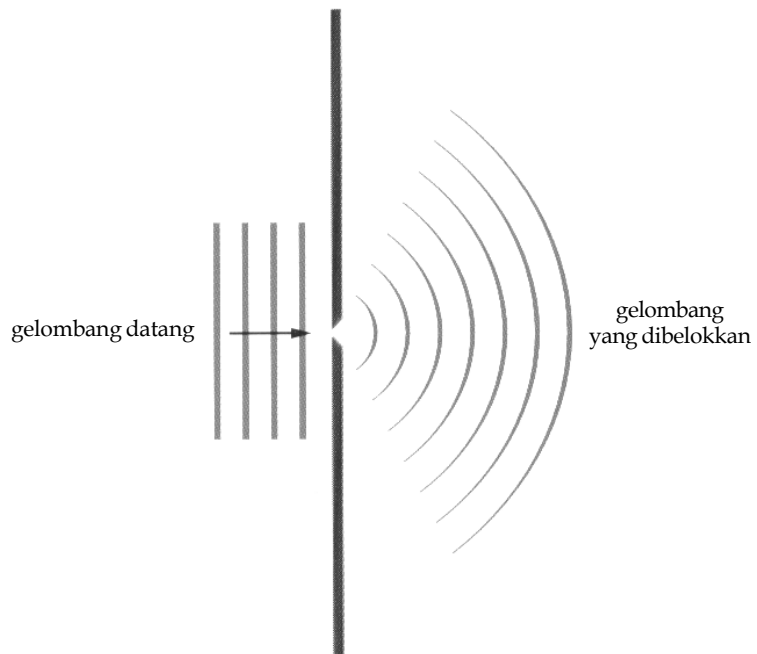


Sumber: Jendela Iptek, 1997

4. Difraksi Gelombang

Ketika gelombang melewati celah sempit atau penghalang, gelombang tersebut akan dibelokkan. Peristiwa ini disebut *difraksi*. Ilustrasinya diperlihatkan pada **Gambar 1.11**. Pembahasan mendalam mengenai difraksi akan dilakukan secara khusus pada Bab 2 tentang gelombang cahaya.

Gambar 1.11
Contoh pembentukan gelombang dengan cara Difraksi.



Soal Penguasaan Materi 1.6

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Berkas gelombang datang dari satu medium ke medium lain dengan sudut datang 60° .
 - a. Jika gelombang tersebut dibiaskan dengan sudut bias 45° , berapakah perbandingan kecepatan gelombang pada kedua medium?
 - b. Jika cepat gelombang pada medium pertama 6 m/s , berapakah cepat rambat gelombang pada medium kedua?

Pembahasan Soal SPMB

Tali yang panjangnya 5 m dan direntangkan dengan gaya 2 N , dirambati gelombang transversal. Jika cepat rambat gelombang tersebut 40 m/s , massa tali tersebut adalah

- a. $6,25 \text{ gram}$
- b. $6,5 \text{ gram}$
- c. $6,75 \text{ gram}$
- d. $6,85 \text{ gram}$
- e. $6,9 \text{ gram}$

Jawab

Diketahui: Gelombang transversal merambat pada tali.

$$\lambda = 5 \text{ m},$$

$$f = 2 \text{ N, dan}$$

$$v = 40 \text{ m/s}.$$

Pada tali yang dirambati gelombang transversal, berlaku persamaan berikut.

$$v = \sqrt{\frac{F_T L}{m}}$$

$$v^2 = \frac{F_T L}{m}$$

$$m = \frac{F_T L}{v^2}$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{(2 \text{ N})(5 \text{ m})}{(40 \text{ m/s})^2} \\ &= 0,00625 \text{ kg} \\ &= 6,25 \text{ gram} \end{aligned}$$

Jawab: a

UMPTN, 1995

Rangkuman

1. **Gelombang** merupakan perambatan suatu getaran yang tidak disertai dengan perpindahan medium perantaranya, tetapi hanya memindahkan energi.
2. **Panjang gelombang** adalah panjang satu puncak dan satu lembah, atau satu rapatan dan satu renggangan.
3. **Periode gelombang** adalah waktu yang diperlukan untuk menempuh satu panjang gelombang. **Frekuensi gelombang** adalah banyaknya gelombang tiap sekon.

$$f = \frac{1}{T} \text{ atau } T = \frac{1}{f}$$

4. **Cepat rambat gelombang** adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu sekon.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

5. Cepat rambat gelombang pada tali bergantung pada gaya tegangan tali dan massa per satuan panjang tali.

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{F_T L}{m}}$$

6. **Simpangan gelombang** adalah jarak partikel yang dilalui gelombang ke titik setimbang, sedangkan amplitudo adalah simpangan maksimumnya.
7. **Gelombang transversal** adalah gelombang yang arah getarnya tegak lurus dengan arah rambatnya, sedangkan **gelombang longitudinal** adalah gelombang yang arah getarnya sejajar dengan arah rambatnya.
8. Persamaan cepat rambat gelombang longitudinal pada zat padat adalah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

9. Persamaan cepat rambat gelombang longitudinal pada zat cair atau gas adalah

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

10. **Gelombang berjalan** adalah gelombang yang bergerak dengan amplitudo tetap. Persamaan umum gelombang berjalan adalah

$$y = A \sin(\omega t - kx + \theta_0)$$

dengan bilangan gelombang

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

frekuensi sudut

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

dan sudut fase gelombang dalam radian

$$\theta = 2\pi\varphi = kx - \omega t + \theta_0.$$

11. **Gelombang stasioner** adalah gelombang yang amplitudonya berubah terhadap posisi. Gelombang stasioner terbentuk dari superposisi dua gelombang beramplitudo dan berpanjang sama.

$$y_s = y_1 + y_2$$

$$y_s = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)]$$

$$y_s = [2A \sin(kx)] \cos(-\omega t)$$

$$y_s = A_s \cos(-\omega t)$$

12. Energi yang dipindahkan gelombang berupa energi getaran dari satu partikel ke partikel lain dalam medium yang dilaluinya.

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

13. Energi yang dipindahkan gelombang tiap satuan luas, tiap satuan waktu disebut **intensitas gelombang**.

$$I = \frac{P}{4\pi R^2}$$

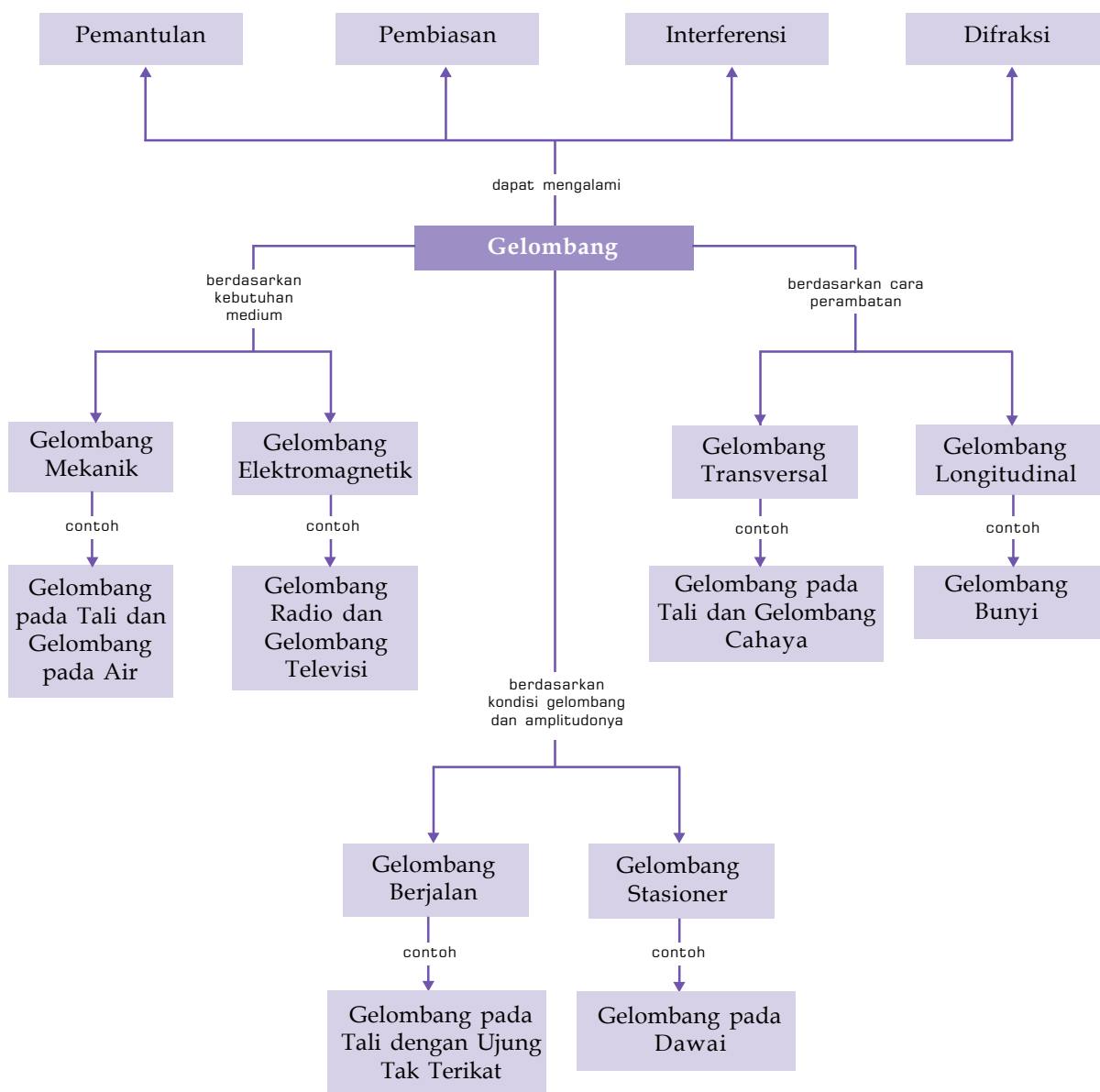
14. Pada peristiwa pemantulan gelombang berlaku **Hukum Pemantulan Gelombang**, yaitu sudut pantul sama dengan sudut datang.

15. **Pembiasan gelombang** adalah pembelokan arah muka gelombang ketika masuk dari satu medium ke medium lain.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}$$

16. **Interferensi gelombang** adalah perpaduan atau superposisi gelombang ketika dua gelombang atau lebih tiba di tempat yang sama pada saat yang sama.
17. **Difraksi gelombang** adalah peristiwa pembelokan cahaya ketika melewati celah sempit atau penghalang.

Peta Konsep



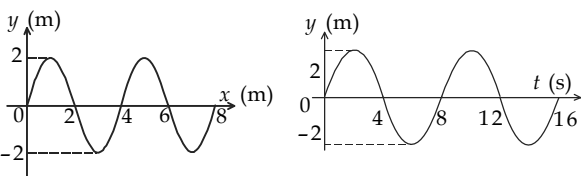
Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Gelombang dan Sifat-Sifatnya, Anda dapat mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum. Jika Anda belum mampu mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum, Anda belum menguasai materi bab Gelombang dan Sifat-Sifatnya dengan baik. Rumuskan

materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 1

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah sumber gelombang bergetar dengan frekuensi 20 Hz. Jika gelombang merambat dengan kecepatan 1,5 m/s, panjang gelombangnya adalah
a. 25 cm d. 60 cm
b. 30 cm e. 75 cm
c. 50 cm
- Butet mencatat bahwa puncak gelombang melewati sebuah titik setiap 2 sekon. Butet juga mengukur bahwa jarak antara dua puncak gelombang yang berdekatan adalah 5 m. Cepat rambat gelombang tersebut adalah
a. 2,5 m/s d. 10 m/s
b. 5 m/s e. 15 m/s
c. 7,5 m/s
- Seorang nelayan merasakan perahunya dihempas gelombang sehingga perahu naik-turun. Waktu yang diperlukan dari puncak ke lembah adalah 3 s. Nelayan juga mengamati bahwa jarak antarpuncak gelombang adalah 12 m. Waktu yang diperlukan gelombang untuk mencapai pantai yang jauhnya 100 m adalah
a. 3 s d. 33 s
b. 4 s e. 50 s
c. 8 s
- Gelombang yang merambat dalam suatu medium diungkapkan dalam bentuk grafik simpangan sebagai fungsi jarak dan waktu yang masing-masing seperti ditunjukkan pada gambar berikut.

Cepat rambat gelombangnya adalah
a. 20 cm/s d. 50 cm/s
b. 25 cm/s e. 75 cm/s
c. 40 cm/s
- Gelombang air laut menyebabkan permukaan air naik-turun dengan periode 2 sekon. Jika jarak antara dua puncak gelombang 5 m, gelombang akan mencapai jarak 10 m dalam waktu
a. 1 sekon d. 4 sekon
b. 2 sekon e. 5 sekon
c. 3 sekon
- Cepat rambat gelombang transversal dalam dawai dapat diperbesar dengan cara
a. memperbesar tegangan dalam dawai
b. memperbesar massa per satuan panjang dawai
c. mengganti dawai dengan yang lebih panjang
d. mengganti dawai dengan yang lebih pendek
e. mengganti dawai dengan massa jenis yang lebih besar
- Gelombang transversal merambat dalam tali yang diberi gaya tegangan 180 N. Jika massa jenis linear tali 0,2 kg/m, cepat rambat gelombangnya adalah
a. 15 m/s d. 60 m/s
b. 30 m/s e. 90 m/s
c. 45 m/s
- Sebuah kabel bermassa 10 kg, panjang 100 m, dan tegangan 4.000 N digetarkan sehingga menghasilkan gelombang tali dengan panjang gelombang 0,4 m. Frekuensi gelombang tersebut adalah
a. 100 Hz
b. 300 Hz
c. 500 Hz
d. 700 Hz
e. 900 Hz
- Dawai dengan massa 500 gram dan panjang 3 m ditegangkan dengan gaya 150 N. Salah satu ujung dawai digetarkan sehingga gelombang merambat dalam dawai. Gelombang akan mencapai ujung dawai lainnya ketika sumber gelombang bergetar selama
a. 0,01 sekon d. 10 sekon
b. 0,1 sekon e. 100 sekon
c. 1 sekon
- Seutas tali yang panjangnya 40 m digetarkan secara transversal. Laju rambat gelombang transversal pada tali tersebut 50 m/s. Jika gaya tegangan pada tali tersebut 2,5 N, massa talinya adalah
a. 0,12 kg d. 0,04 kg
b. 0,09 kg e. 0,03 kg
c. 0,08 kg
- Jika dianggap kerapatan baja 8.000 kg/m^3 dan modulus elastisitasnya $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi untuk merambat dalam besi baja sepanjang 1 km adalah
a. 0,05 s d. 0,2 s
b. 0,1 s e. 0,25 s
c. 0,15 s
- Besi dan baja memiliki massa jenis sama tetapi modulus elastik baja dua kali modulus elastik besi. Perbandingan cepat rambat gelombang longitudinal dalam baja dan besi adalah
a. 1 : 1 d. $\sqrt{2} : 1$
b. $1 : \sqrt{2}$ e. 2 : 1
c. 1 : 2
- Dua batang logam A dan B masing-masing memiliki modulus Young $0,2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ dan $4 \times 10^{11} \text{ Pa}$. Apabila perbandingan antara massa jenis A dan B adalah 20 : 1, perbandingan cepat rambat gelombang bunyi pada logam A dan B adalah
a. 1 : 2 d. 1 : 20
b. 1 : 4 e. 1 : 40
c. 1 : 10

14. Persamaan gelombang $y = \sin 2\pi (4t + 2x)$ dengan t dalam sekon dan x dalam meter, memiliki
- amplitudo 4 m
 - kecepatan 2 m/s
 - periode 4 s
 - panjang gelombang 2 m
 - frekuensi 0,2 Hz
15. Persamaan gelombang $y = \sin 2\pi (4t + 2x)$ dengan t dalam sekon dan x dalam meter, panjang gelombang dan kecepatan rambatnya adalah
- 0,5 m dan 0,5 m/s
 - 0,5 m dan 1 m/s
 - 0,5 m dan 2 m/s
 - 1 m dan 0,5 m/s
 - 2 m dan 1 m/s
16. Suatu gelombang berjalan yang dinyatakan dengan persamaan $y = 0,07 \cos(0,08\pi x - 0,04\pi t)$ meter, dengan t dalam sekon dan x dalam meter, memiliki panjang gelombang sebesar
- 0,5 m
 - 2 m
 - 5 m
 - 10 m
 - 25 m
17. Sebuah gelombang merambat dari sumber S ke kanan dengan laju 8 m/s, frekuensi 16 Hz, dan amplitudo 4 cm. Gelombang itu melalui titik P yang berjarak $9\frac{1}{2}$ m dari S. Jika S telah bergetar $1\frac{1}{4}$ s dan arah gerak pertamanya ke atas, simpangan titik P pada saat itu adalah
- 0 cm
 - 1 cm
 - 2 cm
 - 3 cm
 - 4 cm
18. Sebuah titik P bergetar harmonik sederhana menghasilkan gelombang berjalan dengan cepat rambat 24 m/s, frekuensi 12 Hz, dan amplitudo 10 cm. Pada $t = 0$, simpangan titik P sama dengan nol. Simpangan titik Q yang berada pada jarak 3 m dari P saat P sudah bergetar $\frac{1}{2}$ sekon adalah
- 0
 - 2 cm
 - 5 cm
 - $5\sqrt{2}$ cm
 - $5\sqrt{3}$ cm
19. Persamaan gelombang transversal yang merambat pada suatu kawat adalah $y = -2 \sin \pi (0,5x - 200t)$ Jika x dan y dalam satuan cm dan t dalam sekon, amplitudo dan panjang gelombangnya adalah
- $A = 5$ cm dan $\lambda = 3$ cm
 - $A = 2$ cm dan $\lambda = 4$ cm
 - $A = 6$ cm dan $\lambda = 2$ cm
 - $A = 4$ cm dan $\lambda = 2$ cm
 - $A = 2$ cm dan $\lambda = 6$ cm
20. Sebuah gelombang transversal merambat dengan persamaan $y = 0,2 \sin 8\pi \left(t - \frac{x}{20} + \frac{1}{16}\right)$ meter, x dalam meter, t dalam sekon maka
- cepat rambat gelombang sama dengan 20 m/s,
 - panjang gelombang besarnya 5 meter,
 - frekuensi sudut gelombang sama dengan 8 rad/s,
 - sudut fase mula-mula sumber gelombang 45.
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4
21. Sebuah gelombang yang frekuensinya 500 Hz mempunyai kecepatan sebesar 300 m/s. Jarak antara dua titik yang berbeda fase 120° adalah
- 0,1 m
 - 0,2 m
 - 0,5 m
 - 0,6 m
 - 0,9 m
22. Seutas tali yang panjangnya 8 m memiliki massa 1,04 kg. Tali tersebut digetarkan sehingga sebuah gelombang transversal menjalar dengan persamaan $y = 0,03 \sin(x + 30t)$, x dan y dalam meter dan t dalam sekon. Tegangan tali tersebut adalah
- 0,12 N
 - 0,24 N
 - 0,36 N
 - 0,6 N
 - 0,72 N
23. Gelombang stasioner terbentuk pada tali dengan persamaan $y = 0,5 \cos\left(\frac{\pi x}{3}\right) \sin(40\pi t)$, dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon. Jarak antara dua simpul yang berdekatan adalah
- 3 cm
 - 6 cm
 - 9 cm
 - 12 cm
 - 15 cm
24. Gelombang stasioner dapat terjadi karena superposisi gelombang datang dan gelombang pantul oleh ujung bebas. Titik simpul yang kesepuluh berjarak 1,52 cm dari ujung bebasnya. Jika frekuensi gelombang itu 50 Hz, laju rambat gelombangnya
- 16 m/s
 - 32 m/s
 - 48 m/s
 - 64 m/s
 - 72 m/s
25. Gelombang $y_1 = A \sin(kx - \omega t)$ bersuperposisi dengan gelombang $y_2 = A \sin(kx + \omega t)$. Amplitudo gelombang resultannya
- bergantung pada x ,
 - mempunyai nilai maksimumnya $2A$,
 - mempunyai nilai minimumnya nol,
 - bergantung pada waktu.
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan Kerjakanlah pada buku Latihan Anda

1. Apakah frekuensi gelombang sama dengan frekuensi getaran sumbernya? Mengapa?
2. Selang waktu antara dua puncak gelombang yang melewati sebuah titik adalah 2 sekon. Jika gelombang merambat dengan kecepatan 12 m/s, berapakah panjang gelombangnya?
3. Apa yang terjadi pada cepat rambat gelombang jika frekuensi sumbernya dijadikan dua kali semula? (Anggap panjang gelombangnya tetap).
4. Sebuah kawat yang panjangnya 5 m terikat pada kedua ujungnya. Massa kawat 4 kg dan mengalami gaya tegangan 200 N. Ketika kawat digetarkan, terbentuk 8 buah simpul gelombang. Tentukanlah:
 - a. massa per satuan panjang kawat,
 - b. cepat rambat gelombang pada kawat,
 - c. panjang gelombang pada kawat, dan
 - d. frekuensi gelombangnya.
5. Jenis gelombang apa yang akan merambat pada batang logam horizontal jika ujung batang dipukul secara
 - a. vertikal, dan
 - b. horizontal sejajar panjangnya?
6. Diketahui massa jenis dan modulus Bulk air masing-masing $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ dan $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Sebuah sumber gelombang bunyi di dalam air bergetar dengan frekuensi 1.500 Hz. Tentukanlah:
 - a. cepat rambat, dan
 - b. panjang gelombang bunyi dalam air.
7. Jika sebuah kawat yang ujungnya terikat digetarkan, terbentuk gelombang stasioner. Di manakah jari Anda dapat disentuhkan sehingga tidak mengganggu gerakan kawat?
8. Sebuah gelombang berjalan dengan persamaan
$$y = 4 \sin 8\pi \left(2t - x + \frac{1}{12} \right),$$
 x dan y dalam meter, dan t dalam sekon. Tentukanlah:
 - a. amplitudo,
 - b. frekuensi,
 - c. panjang gelombang,
 - d. cepat rambat gelombang,
 - e. simpangannya saat $t = 0$ dan $x = 0$, serta
 - f. beda fase antara dua titik yang berjarak 50 cm.
9. Tuliskan dua cara yang dapat dilakukan agar cepat rambat gelombang transversal dalam dawai menjadi lebih besar.
10. Dua gelombang masing-masing
$$y_1 = 4 \sin \left(\frac{\pi x}{6} - 2t \right) \text{ dan } y_2 = 4 \sin \left(\frac{\pi x}{6} - 2t \right)$$
bersuperposisi. Tentukanlah:
 - a. amplitudo sebagai fungsi posisi, dan
 - b. jarak antara dua simpul yang berdekatan pada gelombang hasil superposisi.



Sumber: www.someonewhocares.org

B a b 2

Gelombang Bunyi dan Cahaya

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep dan prinsip gejala gelombang dalam menyelesaikan masalah dengan cara mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi dan cahaya serta menerapkan konsep gelombang bunyi dan cahaya dalam teknologi.

Petir adalah fenomena alam yang terjadi akibat adanya bunga api listrik di awan dengan energi yang sangat besar sehingga menimbulkan panas, rentetan cahaya, dan bunyi yang sangat kuat. Udara yang sangat panas akibat energi yang besar dapat membuat udara tersebut bercahaya, sedangkan udara di sekitar sambaran kilat dapat berkembang dengan cepat sehingga menimbulkan bunyi petir .

Ketika Anda mengamati peristiwa terjadinya petir di awan, ada dua macam indra yang Anda libatkan, yaitu penglihatan untuk mengamati kilatan cahaya dan pendengaran untuk mengamati bunyi petir. Sebenarnya, kilatan cahaya dan bunyi petir yang ditimbulkan oleh petir terjadi pada waktu yang bersamaan. Akan tetapi, pernahkah Anda berpikir, mengapa kilatan cahaya selalu tampak lebih dulu terjadi daripada bunyi geledeknya? Mengapa selang waktu terdengarnya bunyi petir antara satu tempat dan tempat lainnya selalu berbeda? Untuk menemukan jawabannya, pelajailah bab ini dengan saksama.

- A. Gelombang Bunyi**
- B. Cahaya sebagai Gelombang**

Soal Pramateri

1. Apakah yang dimaksud dengan gelombang longitudinal dan gelombang elektromagnetik?
2. Apakah yang Anda ketahui tentang panjang gelombang, frekuensi, dan cepat rambat gelombang pada gelombang longitudinal?
3. Menurut pendapat Anda, bagaimanakah sifat-sifat cahaya itu?

Gambar 2.1

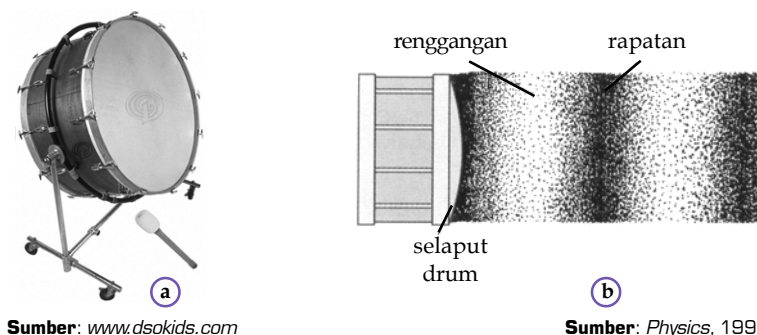
- (a) Drum yang ditabuh.
(b) Getaran sumber bunyi menyebabkan terbentuknya rapatan dan renggangan partikel-partikel yang merambat.

A Gelombang Bunyi

Bunyi berkaitan erat dengan indera pendengaran. Bayangkan jika bunyi tidak ada atau jika indra Anda tidak mampu mendengar bunyi, dunia ini begitu senyap. Pada subbab ini, Anda akan mempelajari aspek-aspek yang berkaitan dengan bunyi.

1. Sifat-Sifat Bunyi

Seperti telah disinggung pada Bab 1, bunyi merupakan salah satu contoh gelombang longitudinal sehingga memiliki sifat-sifat gelombang, seperti resonansi, interferensi, difraksi, refleksi, dan refraksi. Gelombang bunyi selalu membutuhkan medium perantara dalam perambatannya. Perhatikan **Gambar 2.1**



Jelajah Fisika

Drum Sederhana



Anda dapat membuktikan perambatan gelombang bunyi dari drum sekaligus melatih kreatifitas Anda dengan cara membuat drum sederhana. Alat dan bahan yang Anda butuhkan cukup sederhana, di antaranya kaleng bekas biskuit, balon, lem untuk karet, kertas warna, seutas tali, dan gunting. Dengan proses yang cukup sederhana, Anda dapat berkarya sekaligus lebih memahami konsep perambatan gelombang bunyi secara langsung. Selamat mencoba.

Sumber: 101 Great Science Experiments, 1998

Ketika drum ditabuh, seperti terlihat pada **Gambar 2.1(a)**, energi getaran dari drum menyebabkan partikel-partikel udara di sekitarnya bergetar mengikuti getaran drum. Kemudian, energi ini dipindahkan sehingga terbentuklah rapatan dan renggangan di udara. Jika gelombang ini sampai ke indra pendengaran manusia, terdengarlah bunyi getaran drum tadi. **Gambar 2.1(b)** mengilustrasikan bagaimana gelombang bunyi yang berasal dari drum merambat di udara.

Bunyi merambat dengan kecepatan berbeda, bergantung pada medium yang dilaluinya. Pada bab sebelumnya, telah Anda pelajari bahwa kecepatan rambat bunyi pada medium zat padat dan zat cair bergantung pada interaksi antara molekul dan sifat inersia medium. Interaksi antara molekul-molekul zat padat dinyatakan dengan modulus Young (E), sedangkan zat cair dinyatakan dengan modulus Bulk (B). Sifat inersia medium dinyatakan oleh massa jenis mediumnya (ρ). **Persamaan (1-4)** dan **(1-5)** pada Bab 1 menunjukkan bahwa kecepatan rambat bunyi bergantung pada modulus Young (pada zat padat) atau modulus Bulk (pada zat cair) dan massa jenis mediumnya. Persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{dan} \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Kecepatan bunyi juga bergantung pada temperatur, terutama pada gas. Sebagai contoh, kecepatan bunyi di udara naik sebesar 0,6 m/s setiap kenaikan suhu udara sebesar 1°C. Di ruang hampa, bunyi tidak dapat merambat.

Ditinjau dari frekuensinya, bunyi dikelompokkan sebagai infrasonik (kurang dari 20 Hz), audiosonik (20 Hz sampai dengan 20 kHz), dan ultrasonik (lebih dari 20 kHz). Manusia hanya dapat mendengar bunyi audiosonik. Beberapa hewan dapat mendengar bunyi di luar audiosonik. Misalnya, anjing dapat mendengar bunyi dengan frekuensi setinggi 50.000 Hz dan kelelawar dapat mendengar bunyi sampai 10.000 Hz.

Contoh 2.1

Kecepatan rambat bunyi di udara pada suhu 0°C adalah 331 m/s . Berapakah kecepatan bunyi ketika suhu udara 20°C ?

Jawab

Diketahui: pada suhu 0°C , $v = 331\text{ m/s}$.

Setiap kenaikan suhu 1°C , kecepatan bunyi naik $0,6\text{ m/s}$. Untuk kenaikan suhu 20°C , kecepatan bunyi naik sebesar

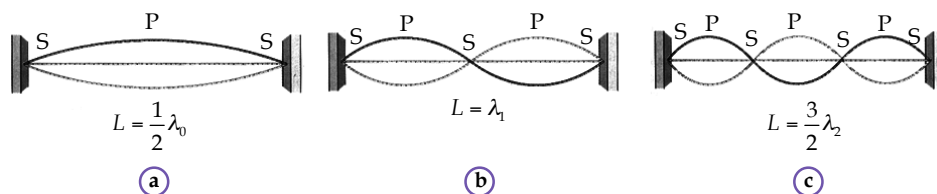
$$v = (20\text{ m/s})(0,6\text{ m/s}) = 12\text{ m/s}.$$

Dengan demikian, ketika suhu udara 20°C , kecepatan bunyi adalah

$$v = 331\text{ m/s} + 12\text{ m/s} = 343\text{ m/s}.$$

2. Dawai sebagai Sumber Bunyi

Seutas dawai atau senar yang kedua ujungnya terikat jika digetarkan akan membentuk gelombang stasioner. Getaran ini akan menghasilkan bunyi dengan nada tertentu, bergantung pada jumlah gelombang yang terbentuk pada dawai tersebut. Pola gelombang stasioner ketika terjadi nada dasar (harmonik pertama), nada atas pertama (harmonik kedua), dan nada atas kedua (harmonik ketiga) adalah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2**. Jika panjang dawai tidak berubah, pola gelombang berikutnya merupakan penambahan setengah gelombang dari pola sebelumnya.



Gambar 2.2

Pola gelombang pada dawai saat terjadi
(a) nada dasar,
(b) nada atas pertama, dan
(c) nada atas kedua.

Frekuensi nada yang dihasilkan bergantung pada pola gelombang yang terbentuk pada dawai. Seperti dapat dilihat pada **Gambar 2.2**, panjang gelombang nada dasar, nada atas pertama, dan nada atas kedua berturut-turut $2L$, L , dan $\frac{2}{3}L$. Secara umum, ketiga panjang gelombang tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\lambda_n = \frac{2L}{n+1} \quad (2-1)$$

Dengan demikian, frekuensi nada yang dihasilkan dawai memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (n+1) \frac{v}{2L} \quad (2-2)$$

dengan: f_n = frekuensi nada ke- n (Hz),

v = cepat rambat gelombang dalam dawai, dan

L = panjang dawai.

Nilai $n = 0, 1, 2, \dots$, yaitu bilangan yang menyatakan nada dasar, nada atas pertama, nada atas kedua, dan seterusnya.

Telah Anda ketahui pada bab sebelumnya bahwa kecepatan rambat gelombang pada tali (dawai) memenuhi persamaan

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad (2-3)$$



Loncatan Kuantum



Sumber: www.mandoweb.com.

Alat-alat musik bekerja dengan membuat gelombang bunyi. Bentuk, ukuran, dan bahan alat musik memengaruhi bunyi yang ditimbulkan. Beberapa alat musik memiliki kotak suara yang bergetar. Artinya, getaran kotak suara pada frekuensi yang sama dengan getaran udara yang ditimbulkan oleh bunyi asli, menimbulkan bunyi yang lebih penuh dan lebih kaya.

Quantum Leap

Musical instruments work by making sound waves. The shape and size of which it is made affect the sound. Some instrument have a soundbox that resonates. This means that it vibrates at the same frequency as the air vibrations created by the original sound, making the sound fuller and richer.

Sumber: *Science Encyclopedia*, 2000.

dengan: F_T = gaya tegangan dawai (N), dan
 μ = massa jenis dawai (kg/m).

Jika **Persamaan (2-3)** disubstitusikan ke **Persamaan (2-2)**, diperoleh

$$f_n = (n + 1) \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad (2-4)$$

Selanjutnya, jika dibandingkan frekuensi setiap nada, akan diperoleh

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots \quad (2-5)$$

Persamaan (2-5) menunjukkan bahwa frekuensi nada atas yang dihasilkan dawai merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi nada dasarnya. Sebagai contoh, jika frekuensi nada dasarnya 100 Hz, frekuensi nada atas pertama, nada atas kedua, nada atas ketiga, dan seterusnya berturut-turut adalah 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, dan seterusnya. Perhatikan pula bahwa selisih frekuensi antara dua nada berurutan sama dengan frekuensi nada dasarnya.

Contoh 2.2

Dawai gitar dengan panjang 60 cm digetarkan dan terdengar nada dasar dengan frekuensi 300 Hz. Berapakah cepat rambat gelombang dalam dawai?

Jawab

Diketahui: $L = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$ dan $f_0 = 300 \text{ Hz}$.

Dari **Persamaan (2-2)**, untuk $n = 0$ (nada dasar) diperoleh $f_0 = \frac{v}{2L}$ sehingga

$$v = 2Lf_0 = (2)(0,6 \text{ m})(300 \text{ Hz}) = 360 \text{ m/s}.$$

Contoh 2.3

Senar yang kedua ujungnya terikat digetarkan sehingga terbentuk gelombang stasioner dengan 2 buah perut. Panjang dawai 50 cm dan cepat rambat gelombang dalam dawai 240 m/s. Tentukan frekuensi nada yang dihasilkannya.

Jawab

Diketahui: $L = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$, $v = 240 \text{ m/s}$, dan terbentuk 2 buah perut gelombang.

Pola gelombang dengan 2 buah perut terjadi untuk nada atas pertama ($n = 1$), ingat **Gambar 2.2** di halaman 25. Gunakan **Persamaan (2-2)** untuk $n = 1$ sehingga diperoleh

$$f_1 = \frac{v}{L} = \frac{240 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m}} = 480 \text{ Hz}.$$

Contoh 2.4

Seutas kawat dengan panjang 1 m dan massa jenis linear 0,2 kg/m terikat pada kedua ujungnya. Jika frekuensi nada dasar yang dihasilkan 250 Hz, berapakah besar gaya tegangan kawat?

Jawab

Diketahui: $L = 1 \text{ m}$, $\mu = 0,2 \text{ kg/m}$, dan $f_0 = 250 \text{ Hz}$.

Gunakan **Persamaan (2-4)** untuk $n = 0$ (nada dasar) maka

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

Kuadratkan kedua ruas persamaan tersebut dan susun kembali sehingga akhirnya diperoleh

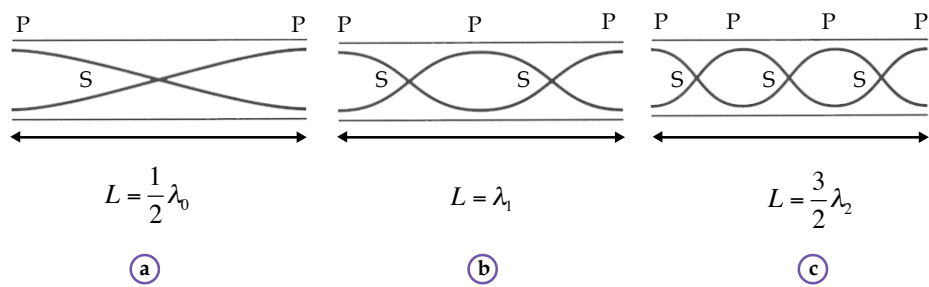
$$F = 4\mu f_0^2 L^2 = (4)(0,2 \text{ kg/m})(250 \text{ Hz})^2 (1 \text{ m})^2 = 5 \times 10^5 \text{ N}.$$

3. Pipa Organa sebagai Sumber Bunyi

Ada dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka (kedua ujungnya terbuka) dan pipa organa tertutup (salah satu ujungnya tertutup).

a. Pipa Organa Terbuka

Pipa organa menghasilkan bunyi dengan nada tertentu ketika ditiup. Pola gelombang stasioner yang terjadi pada nada dasar, nada atas pertama, dan nada atas kedua adalah seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Pola nada berikutnya merupakan penambahan setengah gelombang dari pola sebelumnya dengan panjang pipa tetap.



Kata Kunci

- Dawai
- Gelombang bunyi
- Gelombang longitudinal
- Pipa organa

Gambar 2.3

Pola gelombang pada pipa organa terbuka. Saat terjadi (a) nada dasar, (b) nada atas pertama, dan (c) nada atas kedua.

Dari **Gambar 2.3**, panjang gelombang nada dasar, nada atas pertama, dan nada atas kedua berturut-turut $2L$, L , dan $\frac{2}{3}L$. Sama dengan pada dawai, ketiga panjang gelombang ini dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\lambda_n = \frac{2L}{n+1} \tag{2-6}$$

Dengan demikian, frekuensi nada yang dihasilkan pipa organa terbuka memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (n+1) \frac{v}{2L} \tag{2-7}$$

dengan: f_n = frekuensi nada ke- n (Hz),
 v = cepat rambat bunyi dalam gas/udara di dalam pipa (m/s), dan
 L = panjang pipa (m).

Nilai $n = 0, 1, 2, \dots$, yaitu bilangan yang menyatakan nada dasar, nada atas pertama, nada atas kedua, dan seterusnya.

Selanjutnya, perbandingan frekuensi setiap nada memenuhi

$$f_0 : f_1 : f_2 \dots = 1 : 2 : 3 : \dots \tag{2-8}$$



Sumber: www.chritlutherranchurch.mb.ca.

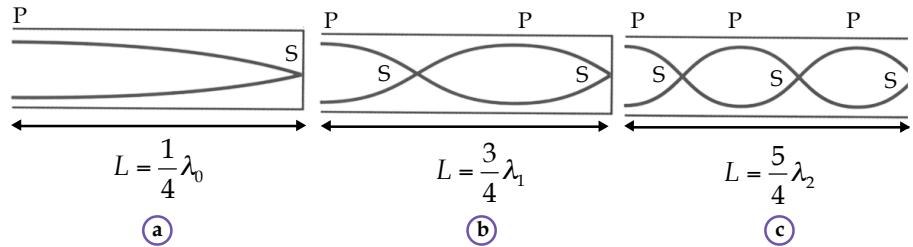
Gambar 2.4

Salah satu contoh sebuah pipa organa.



b. Pipa Organa Tertutup

Berbeda dengan pipa organa terbuka, pola gelombang pada pipa organa tertutup adalah seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5

Pola gelombang pada pipa organa tertutup saat terjadi
(a) nada dasar,
(b) nada atas pertama, dan
(c) nada atas kedua.

Dari **Gambar 2.5**, panjang gelombang nada dasar, nada atas pertama, dan nada atas kedua berturut-turut $4L$, $\frac{4}{3}L$, dan $\frac{4}{5}L$. Secara umum, diperoleh

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n+1} \quad (2-9)$$

sehingga frekuensi nadanya memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (2n+1) \frac{v}{4L} \quad (2-10)$$

dengan: f_n = frekuensi nada ke- n (Hz),

v = cepat rambat bunyi dalam pipa (m/s), dan

L = panjang pipa (m).

Nilai $n = 0, 1, 2, \dots$, berturut-turut bilangan yang menyatakan nada dasar, nada atas pertama, nada atas kedua, dan seterusnya.

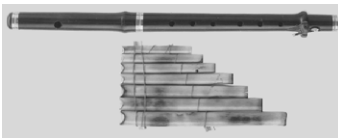
Perbandingan frekuensi setiap nada memenuhi

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots \quad (2-11)$$

yang menunjukkan bahwa frekuensi nada atas merupakan kelipatan bilangan ganjil dari frekuensi nada dasarnya.

Jelajah Fisika

Alat Musik Tiup



Pada alat musik tiup pipa pan (bawah), udara di dalam setiap tabung bergetar kuat pada satu frekuensi dasar saja. Frekuensi dasar ini bergantung pada panjang tabung yang bersangkutan. Semakin panjang tabungnya, semakin rendah frekuensi resonannya. Pada seruling (atas), frekuensi getaran diubah-ubah dengan menutupi lubang-lubang seruling untuk mengubah panjang efektif tabungnya.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Contoh 2.5

Sebuah pipa organa memiliki panjang 60 cm. Jika cepat rambat bunyi di udara sebesar 330 m/s, tentukan frekuensi nada dasar dan dua nada atas berikutnya jika:

- pipa terbuka pada kedua ujungnya, dan
- pipa tertutup pada salah satu ujungnya.

Jawab

Diketahui: $L = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$ dan $v = 330 \text{ m/s}$.

- Untuk pipa organa terbuka, gunakan **Persamaan (2-7)** maka frekuensi nada dasarnya ($n = 0$) adalah

$$f_0 = \frac{v}{2L} = \frac{330 \text{ m/s}}{(2)(0,6 \text{ m})} = 275 \text{ Hz.}$$

Dua nada atas berikutnya adalah nada atas pertama dan nada atas kedua. Dari **Persamaan (2-8)**, diperoleh nada atas pertama dan nada atas kedua masing-masing

$$f_1 = 2f_0 = (2)(275 \text{ Hz}) = 550 \text{ Hz} \text{ dan } f_2 = 3f_0 = (3)(275 \text{ Hz}) = 825 \text{ Hz.}$$

- b. Untuk pipa organa tertutup, gunakan **Persamaan (2-10)** maka frekuensi nada dasarnya

$$f_0 = \frac{v}{4L} = \frac{330 \text{ m/s}}{(4)(0,6 \text{ m})} = 137,5 \text{ Hz.}$$

Berdasarkan **Persamaan (2-11)**, diperoleh nada atas pertama dan nada atas kedua masing-masing

$$f_1 = 3f_0 = (3)(137,5 \text{ Hz}) = 412,5 \text{ Hz dan } f_2 = 5f_0 = (5)(137,5 \text{ Hz}) = 687,5 \text{ Hz.}$$

Contoh 2.6

Sebuah pipa organa dapat menghasilkan frekuensi harmonik berturut-turut 264 Hz, 440 Hz, dan 616 Hz.

- Apakah pipa organa tersebut terbuka atau tertutup?
- Berapa frekuensi nada dasarnya?

Jawab

- Pipa organa dapat dikenali dari perbandingan frekuensinya. Dalam kasus ini, perbandingan frekuensi pipa adalah 264 Hz : 440 Hz : 616 Hz = 3 : 5 : 7. Perbandingan terkecil diperoleh dengan cara membagi 264 Hz, 440 Hz, dan 616 Hz dengan faktor persekutuan terbesar (FPB) dari ketiga frekuensi tersebut, yaitu 88. Perbandingan frekuensi 3 : 5 : 7 menunjukkan bahwa pipa tersebut adalah *pipa organa tertutup*.
- Frekuensi nada dasar pipa organa tersebut sama dengan FPB dari ketiga frekuensinya, yaitu 88 Hz.

4. Resonansi Bunyi

Resonansi adalah peristiwa bergetarnya suatu benda akibat benda lain yang bergetar. Resonansi terjadi jika frekuensi benda yang bergetar sama dengan frekuensi alamiah benda di dekatnya. Sebagai contoh, seutas dawai bergetar sehingga menghasilkan bunyi dengan frekuensi f_d di dekat lubang sebuah pipa organa terbuka yang memiliki frekuensi alamiah f_p maka resonansi terjadi jika $f_d = f_p$.

Percobaan yang umum dilakukan untuk menunjukkan peristiwa resonansi adalah dengan mencelupkan tabung yang kedua ujungnya terbuka ke dalam air secara vertikal, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Di mulut tabung bagian atas digetarkan garputala dengan frekuensi f atau panjang gelombang λ . Tabung diangkat perlahan. Resonansi terjadi ketika panjang kolom tabung di atas permukaan air memenuhi persamaan

$$L_n = (2n - 1) \frac{1}{4} \lambda \quad (2-12)$$

dengan: L_n = panjang kolom udara ke- n , dan

$n = 1, 2, 3, \dots$, bersesuaian dengan resonansi pertama, kedua, ketiga, dan seterusnya.

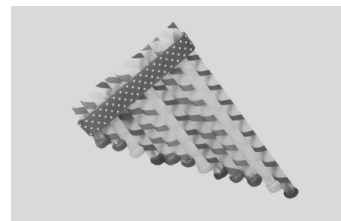
Pada peristiwa resonansi di sini, panjang gelombangnya tetap sehingga perbandingan panjang kolom udara dalam tabung memenuhi

$$L_0 : L_1 : L_2 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots \quad (2-13)$$

Jelajah

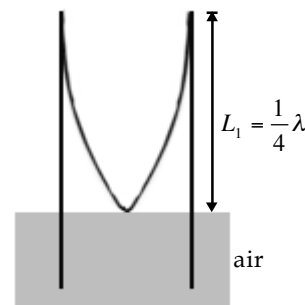
Fisika

Pipa Pan Sederhana



Frekuensi nada pada pipa pan bergantung pada panjang tabung yang bersangkutan. Untuk membuktikannya, Anda dapat berkreasi membuat pipa pan sederhana yang terbuat dari beberapa buah sedotan plastik yang panjangnya berbeda-beda dengan salah satu ujungnya tertutup. Jika Anda menempelkan setiap sedotan plastik tersebut, seperti pada gambar, kemudian meniup di bagian tepi ujung terbuka, Anda akan mendapatkan bunyi nada yang berbeda-beda dari setiap sedotan. Anda ingin membuktikan? Silakan mencoba.

Sumber: 101 Great Science Experiments, 1998



Gambar 2.6

Terjadinya resonansi pertama pada tabung yang dicelupkan pada air.

Jelajah

Fisika

Resonansi Bunyi



Resonansi terjadi akibat energi dialihkan pada benda yang bergetar, kemudian getaran tersebut menumpuk dan menambah amplitudo atau besarnya getaran. Pada situasi tertentu, energi yang dialihkan dapat merusak. Gelas kristal dapat pecah oleh suatu gelombang bunyi jika frekuensinya sama dengan frekuensi alami gelas.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Contoh 2.7

Sebuah tabung gelas kedua ujungnya terbuka. Tabung gelas tersebut dimasukkan ke dalam bejana berisi air. Di atas tabung digetarkan garputala dengan frekuensi tertentu. Mula-mula, tabung penuh berisi air, lalu ditarik ke atas. Jika bunyi paling keras pertama terdengar pada saat panjang tabung yang di atas air 20 cm dan kecepatan rambat bunyi saat itu 340 m/s, tentukan:

- panjang gelombang bunyi tersebut di udara, dan
- frekuensi bunyi.

Jawab

Diketahui: $L_1 = 20$ cm dan $v = 340$ m/s.

- Gunakan **Persamaan (2-12)**. Untuk $n = 1$, $L_1 = \frac{1}{4}\lambda$ sehingga panjang gelombangnya

$$\lambda = 4L_1 = 4(20 \text{ cm}) = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}.$$

- Frekuensi bunyi

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,8 \text{ m}} = 425 \text{ Hz}.$$

Contoh 2.8

Nada atas pertama pipa organa terbuka yang panjangnya 40 cm beresonansi dengan pipa organa tertutup. Jika pada saat beresonansi jumlah simpul pada kedua pipa sama, berapakah panjang pipa organa tertutup dalam cm?

Jawab

Diketahui: panjang pipa organa terbuka, sebut pipa A, yaitu $L = 40$ cm. Gunakan **Persamaan (2-7)**. Untuk $n = 1$ (frekuensi nada atas pertama)

$$f_{1A} = \frac{v}{L} = \frac{v}{40 \text{ cm}}.$$

Gambar 2.3 di halaman 27 memperlihatkan bahwa pada nada atas pertama terdapat 2 simpul (S). Sementara itu, dari **Gambar 2.5** di halaman 28, jumlah simpul sebanyak 2 buah dimiliki oleh pola gelombang pipa organa tertutup pada nada atas pertama juga. Oleh karena beresonansi, frekuensi nada atas pertama untuk kedua pipa sama atau

$$f_{1B} = f_{1A} = \frac{v}{40}.$$

Dengan demikian, sesuai **Persamaan (2-5)**, untuk $n = 1$ (nada atas pertama), panjang pipa organa tertutup adalah

$$L = \frac{3v}{4f_{1B}} = \frac{3\cancel{v}}{4\left(\frac{\cancel{v}}{40 \text{ cm}}\right)} = 30 \text{ cm}.$$

Kata Kunci

- Intensitas ambang
- Intensitas bunyi
- Resonansi bunyi
- Taraf intensitas bunyi

5. Intensitas Bunyi

Seperti telah dibahas pada Bab 1, *intensitas* didefinisikan sebagai energi yang dipindahkan tiap satuan luas tiap satuan waktu atau daya yang dipancarkan tiap satuan luas. Secara matematis dinyatakan dengan

$$I = \frac{P}{A} \quad (2-14)$$

dengan: I = intensitas bunyi (W/m^2),
 P = daya sumber bunyi (W), dan
 A = luas (m^2).

Jika sumber bunyi memancarkan bunyi secara isotropik (menyebar ke segala arah sama rata), luas yang dimaksud sama dengan luas permukaan bola, yaitu

$$A = 4\pi R^2 \quad (2-15)$$

dengan R = jari-jari bola = jarak titik ke sumber bunyi (m). Jika **Persamaan (2-15)** dimasukkan ke **Persamaan (2-14)**, diperoleh

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (2-16)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa intensitas bunyi di suatu titik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik tersebut ke sumber bunyi. Sebagai contoh, jika jaraknya menjadi 2 kali semula, kuadrat jaraknya adalah

$2^2 = 4$ kali semula sehingga intensitasnya menjadi $\frac{1}{4}$ kali semula.

Intensitas bunyi yang dapat didengar oleh telinga manusia umumnya berkisar dari $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ sampai dengan $1 \text{ W}/\text{m}^2$. Jangkauan intensitas ini sangat lebar sehingga apa yang Anda persepsikan sebagai kuat bunyi, berkaitan dengan bunyi kuat atau lemah, tidak secara langsung sebanding dengan intensitas bunyi. Hubungan antara kuat bunyi dan intensitas bunyi diberikan oleh **Alexander Graham Bell** dengan mendefinisikan *taraf intensitas bunyi*.

Taraf intensitas bunyi adalah logaritma perbandingan intensitas bunyi terhadap intensitas ambang. *Intensitas ambang* adalah intensitas bunyi minimum yang masih dapat didengar oleh manusia, yakni $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$. Taraf intensitas bunyi dinyatakan dalam satuan desibel (dB). Secara matematis, taraf intensitas bunyi dituliskan dengan persamaan.

$$TI = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2-17)$$

dengan: TI = taraf intensitas (dB),
 I = intensitas bunyi (W/m^2), dan
 I_0 = intensitas ambang = $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$.

Contoh 2.9

Gelombang bunyi dipancarkan dari sebuah sumber dengan daya $3,6\pi \text{ mW}$. Tentukan:

- intensitas bunyi, dan
- taraf intensitas bunyi pada jarak 3 m dari sumber.

Jawab

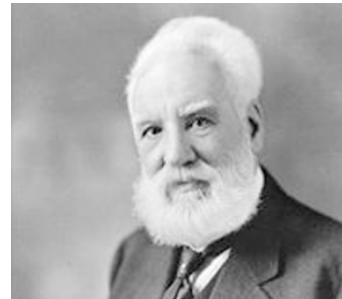
Diketahui: $P = 3,6\pi \text{ mW} = 3,6\pi \times 10^{-3} \text{ W}$ dan $R = 3 \text{ m}$.

- Dengan menggunakan **Persamaan (2-14)** maka intensitas bunyi pada jarak 3 m dari sumber adalah

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{3,6\pi \times 10^{-3} \text{ W}}{(4)(\pi)(3\text{m})^2} = 10^{-4} \text{ W}/\text{m}^2.$$

Jelajah Fisika

Alexander Graham Bell
(1847 – 1922)



Alexander Graham Bell lahir pada 3 Maret 1847 di Edinburh, Skotlandia. Bell dikaruniai bakat intelektual dan rasa ingin tahu yang kuat. Faktor tersebutlah yang mendorong Bell untuk terus tiada henti melakukan berbagai macam percobaan yang didasarkan pada ide-ide orisinal yang dimilikinya. Salah satu penemuannya yang terkenal adalah pada saat berusia 29 tahun, Bell berhasil menemukan telepon bersama asistennya, Thomas A. Watson.

Sumber: www.sekolahindonesia.com

Perlu Anda

Ketahui

Logaritma merupakan kebalikan dari hitungan pangkat. Jika $a^b = c$, dengan $a > 0$ dan $a \neq 1$, maka ${}^a\log c = b$. Dalam hal ini, a disebut basis atau bilangan pokok logaritma dan c disebut nilai yang di-logaritman. Jika basis logaritma adalah 10, umumnya basis tersebut tidak ditulis, misalnya ${}^{10}\log 5$ cukup ditulis $\log 5$.



- b. Taraf intensitasnya adalah

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-4} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10 \log 10^8 = 10(8) = 80 \text{ dB.}$$

Contoh 2.10

- a. Jika jumlah sumber bunyi dijadikan 10 kali semula, berapa perubahan taraf intensitasnya pada jarak yang tetap?
b. Jika jumlah sumber bunyi tetap, tetapi jaraknya dijadikan 10 kali semula, berapa perubahan taraf intensitasnya?

Jawab

- a. Misalnya, intensitas mula-mula I_1 . Kemudian, intensitasnya menjadi 10 kali semula, $I_2 = 10I_1$. Dengan demikian, taraf intensitasnya

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{10I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log 10 = TI_1 + 10 \text{ dB}$$

sehingga perubahannya (selisihnya) adalah

$$\Delta TI = TI_2 - TI_1 = 10 \text{ dB.}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *jika jumlah sumber bunyinya berlipat 10 kali, taraf intensitasnya bertambah 10 dB.*

- b. Misalnya, ketika jarak ke sumber bunyi sama dengan R_1 , intensitas bunyinya I_1 , sedangkan ketika jaraknya $R_2 = 10R_1$, intensitasnya I_2 . Dari **Persamaan (2-16)** diketahui bahwa intensitas berbanding terbalik dengan kuadrat jarak sehingga perbandingan intensitasnya dapat ditulis

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 = \left(\frac{R_1}{10R_1} \right)^2 = 10^{-2} \text{ atau } I_2 = 10^{-2} I_1.$$

Dengan demikian, taraf intensitasnya pada jarak R_2

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-2} I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log 10^{-2} = TI_1 + 10(-2) = TI_1 - 20 \text{ dB}$$

sehingga diperoleh perbedaannya

$$\Delta TI = TI_2 - TI_1 = -20 \text{ dB.}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa jika jarak titik ke sumber bunyi berlipat 10 kali, taraf intensitasnya berkurang 20 dB.

Contoh 2.11

Taraf intensitas bunyi di suatu titik yang berjarak 3 m dari sebuah sumber adalah 50 dB.

- a. Berapakah taraf intensitas bunyi di titik tersebut jika jumlah sumbernya 100 buah (sumber bunyi identik)?
b. Berapakah taraf intensitas bunyi oleh 10 buah sumber tersebut pada jarak 30 m?

Jawab

- a. Diketahui taraf intensitas oleh sebuah sumber pada jarak 3 m adalah 50 dB. **Contoh 2.10(a)** menunjukkan bahwa *jika jumlah sumbernya berlipat 10 kali, taraf intensitasnya bertambah 10 dB.* Ini berarti, jika jumlah sumbernya berlipat 100 kali (10×10 kali), taraf intensitasnya bertambah 20 dB (2×10 dB). Jadi, taraf intensitas pada jarak 3 m yang dihasilkan oleh 100 buah sumber bunyi adalah $50 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 70 \text{ dB}$.

Perlu Anda

Ketahui

$${}^a\log 1 = 0$$

$${}^a\log a = 1$$

$${}^a\log \frac{1}{a} = -1$$

$${}^a\log a^b = b$$

$${}^a\log bc = {}^a\log b + {}^a\log c$$

$${}^a\log \frac{b}{c} = {}^a\log b - {}^a\log c$$

$$a^{b \log a} = b$$

$${}^a\log b = \frac{{}^c\log b}{{}^c\log a}$$

$${}^a\log b = \frac{1}{{}^b\log a}$$

$$a^d \log b^d = \frac{d}{c} {}^a\log b$$

- b. Dari soal (a) diperoleh taraf intensitas oleh 100 buah sumber pada jarak 3 m adalah 70 dB. Pada jarak 30 m atau 10 kali jarak semula (3 m), taraf intensitasnya berkurang 20 dB (lihat kembali **Contoh 2.10(b)**). Dengan demikian, taraf intensitas bunyi pada jarak 30 m menjadi
 $70 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = 50 \text{ dB}$.

6. Interferensi Bunyi

Ketika dua gelombang secara bersamaan tiba di daerah yang sama, kedua gelombang tersebut dapat berinterferensi. Kenyataan ini dapat terjadi pada semua jenis gelombang. Hasil interferensi bunyi dapat maksimum (kuat) dan minimum (lemah).

Interferensi dua gelombang akan menghasilkan maksimum dan minimum jika kedua gelombangnya *koheren*, yakni memiliki amplitudo, panjang gelombang, atau frekuensi yang sama. Interferensi maksimum terjadi jika dua gelombang yang berinterferensi berbeda lintasan $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$, dan seterusnya. Secara matematis, dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta x = m\lambda \quad (2-18)$$

dengan $m = 0, 1, 2, 3$, dan seterusnya. Di lain pihak, interferensi minimum terjadi jika selisih lintasan gelombangnya $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$, dan seterusnya. Secara matematis,

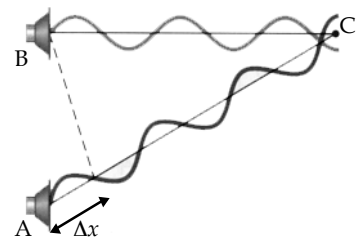
$$\Delta x = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2-19)$$

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$ dan Δx adalah selisih lintasan gelombang seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.

Interferensi juga dapat terjadi antara dua gelombang yang frekuensinya hampir sama (perbedaannya kecil). Gelombang bunyi yang datang dari dua buah sumber berinterferensi dan menghasilkan bunyi keras dan lemah secara bergantian. Fenomena seperti ini disebut *pelayangan bunyi*. Frekuensi pelayangan bunyi sama dengan selisih kedua frekuensi bunyi yang berinterferensi, yaitu

$$\Delta f = |f_1 - f_2| \quad (2-20)$$

dengan: f = frekuensi pelayangan (Hz),
 f_1 = frekuensi bunyi pertama (Hz), dan
 f_2 = frekuensi bunyi kedua (Hz).



Gambar 2.7

Hasil interferensi di titik C bergantung pada selisih lintasan Δx .

Mahir Meneliti 2.1

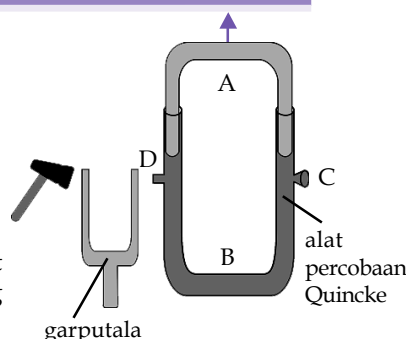
Percobaan Quincke

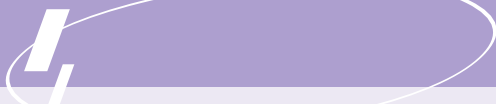
Alat dan Bahan

1. Alat percobaan Quincke atau dua tabung pipa U
2. Garputala

Prosedur

1. Siapkan alat dan bahan.
2. Jika alat percobaan Quincke tidak ada, Anda dapat membuatnya dengan cara menyusun dua tabung pipa U seperti gambar di samping.





Jelajah

Fisika

Kelelawar



Sumber: www.insightmagazine.com

Kelelawar dapat "melihat" di tempat gelap dengan menggunakan ultrasonik. Kelelawar mengeluarkan pulsa gelombang bunyi pendek berfrekuensi tinggi. Gelombang tersebut dipantulkan oleh serangga yang sedang terbang sehingga terjadilah gema yang dapat didengar oleh kelelawar. Semakin pendek waktu antara pulsa dan gema, semakin dekat pula serangga yang akan disambarnya. Ketika mendekati sasaran, kelelawar mengeluarkan pulsa lebih sering sehingga dapat mengetahui posisi serangga dengan ketepatan yang lebih tinggi.

Sumber: *Jendela iptek*, 1997

3. Diameter tabung pipa A lebih kecil dari pada tabung pipa B sehingga ujung pipa A dapat dimasukkan ke dalam pipa B.
4. Pada tabung pipa B terdapat tabung C yang dilengkapi membran yang mudah bergetar dan lubang D sebagai tempat sumber bunyi dari garputala.
5. Getarkanlah garputala pada lubang D secara terus menerus.
6. Bersamaan dengan itu, tariklah tabung pipa A secara perlahan sehingga pada kondisi tertentu membran akan bergetar kuat dan lemah secara bergantian.
7. Diskusikanlah hasil percobaan yang Anda lakukan, kemudian buatlah kesimpulan dari percobaan tersebut.

Contoh 2.12

Dua buah pengeras suara ditempatkan pada jarak 7 m satu sama lain. Kedua pengeras suara itu menghasilkan bunyi dengan frekuensi 170 Hz. Made semula berada di titik tengah pada garis hubung antara kedua pengeras suara. Kemudian, Made bergeser mendekati salah satu pengeras suara sehingga Made mendengar bunyi yang semakin lemah dan akhirnya minimum ketika ia berada pada jarak 3 m dari salah satu pengeras suara. Berapakah cepat rambat bunyi di udara saat itu?

Jawab

Ketika Made berada di tengah-tengah, $\Delta x = 0$, Made akan mendengar bunyi keras (maksimum). Ketika Made berada pada jarak 3 m dari salah satu pengeras suara (atau 4 m dari pengeras suara lainnya), Made mendapati minimum pertama atau $m = 1$ dan pada titik itu selisih lintasannya $x = 4 \text{ m} - 3 \text{ m} = 1 \text{ m}$. Dengan demikian,

dari **Persamaan (2-19)**, untuk $m = 1$, diperoleh $\Delta x = \frac{1}{2}\lambda$ sehingga panjang gelombangnya adalah

$$\lambda = 2\Delta x = (2)(4 \text{ m} - 3 \text{ m}) = 2 \text{ m}.$$

Dengan demikian, cepat rambat bunyinya adalah

$$v = \lambda f = (2 \text{ m})(170 \text{ Hz}) = 340 \text{ m/s}.$$

Contoh 2.13

Dua buah dawai identik menghasilkan nada dasar dengan frekuensi 400 Hz. Jika tegangan pada salah satu dawai ditambah 2%, berapakah frekuensi pelayangan yang terjadi?

Jawab

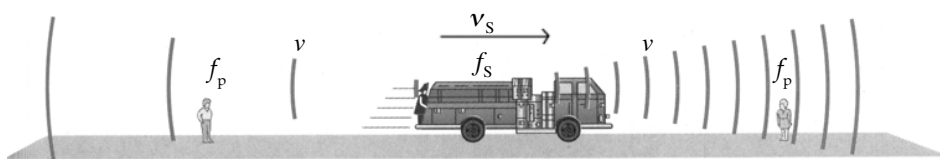
Tegangan dawai ditambah 2% berarti tegangannya menjadi $100\% + 2\% = 102\%$ atau 1,02 kali semula. Dari **Persamaan (2-7)**, *frekuensi dawai sebanding dengan akar gaya tegangan dawai*. Dengan demikian, frekuensinya menjadi $\sqrt{1,02} = 1,01 = 1,01$ kali semula atau $1,01 \times 400 = 404 \text{ Hz}$. Oleh karena frekuensi dawai lain tetap 400 Hz, terjadilah pelayangan dengan frekuensi $404 \text{ Hz} - 400 \text{ Hz} = 4 \text{ Hz}$.

7. Efek Doppler

Efek Doppler adalah peristiwa berubahnya frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar karena adanya perubahan jarak (gerak relatif) antara sumber bunyi dan pendengar. Frekuensi bunyi yang diterima pendengar lebih besar daripada frekuensi sumbernya jika jarak antara sumber dan pendengar semakin dekat. Sebaliknya, frekuensi bunyi yang diterima pendengar lebih kecil daripada frekuensi sumbernya jika jarak antara sumber dan pendengar semakin jauh.

Kata Kunci

- Efek doppler
- Interferensi bunyi
- Pelayangan bunyi



Gambar 2.8

Ilustrasi efek doppler.

Secara matematis, frekuensi yang diterima pendengar memenuhi persamaan

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s \quad (2-21)$$

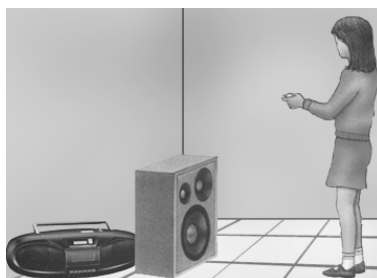
dengan: f_p = frekuensi bunyi yang diterima pendengar (Hz),
 f_s = frekuensi bunyi yang dipancarkan sumber(Hz),
 v = cepat rambat bunyi (m/s),
 v_p = kecepatan pendengar (m/s), dan
 v_s = kecepatan sumber bunyi (m/s).

Dari persamaan tersebut, v_p dan v_s dapat bernilai positif atau negatif dengan ketentuan sebagai berikut.

- Nilai v_p positif jika pengamat mendekati sumber. Sebaliknya, v_p bernilai negatif jika pengamat menjauhi sumber.
- Nilai v_s positif jika sumber menjauhi pengamat. Sebaliknya, v_s bernilai negatif jika sumber mendekati pengamat.

Kerjakanlah

Sediakanlah sebuah *tape recorder* yang terhubung dengan *speaker*. Nyalakan *tape recorder*, kemudian letakkanlah *speaker* pada jarak tertentu dari posisi Anda. Berjalanlah mendekati *speaker*. Apa yang dapat Anda amati? Setelah itu, lakukanlah hal yang sama, tetapi dengan arah menjauhi *speaker*. Apa yang dapat Anda amati? Berilah kesimpulan Anda dari kegiatan ini, kemudian diskusikan dengan teman-teman dan guru Fisika Anda.



Contoh 2.14

Dua buah mobil masing-masing bergerak saling mendekati dengan kelajuan 30 m/s dan 10 m/s. Mobil pertama membunyikan sirene dengan frekuensi 620 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, berapakah frekuensi bunyi sirene yang terdengar oleh sopir mobil kedua?

Jawab

Diketahui: cepat rambat bunyi $v = 340$ m/s. Sumber (mobil pertama) dan pendengar (mobil kedua) saling mendekati maka $v_s = -30$ m/s dan $v_p = 10$ m/s. Frekuensi bunyi yang diterima pendengar adalah

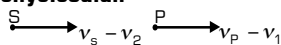
$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} + 10 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}} \right) (620 \text{ Hz}) = 700 \text{ Hz}.$$

Solusi Cerdas

Siregar memacu motornya dengan kelajuan v_1 karena dikejar mobil patroli yang bergerak dengan kelajuan v_2 , sambil membunyikan sirene dengan frekuensi f_2 . Jika kelajuan bunyi di udara adalah v , frekuensi bunyi yang didengar oleh Siregar adalah

- $f_1 = \frac{v + v_1}{v + v_2} f_2$
- $f_1 = \frac{v + v_1}{v - v_2} f_2$
- $f_1 = \frac{v - v_1}{v + v_2} f_2$
- $f_1 = \frac{v - v_1}{v - v_2} f_2$
- $f_1 = \frac{v - v_2}{v - v_1} f_2$

Penyelesaian



Kelajuan tangensial: $v = 2\pi fr$

- $v_p = -v_1$ (karena pengamat menjadi sumber)
 - $v_s = -v_2$ (karena sumber mendekati pengamat)
- maka

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s$$

$$f_1 = \frac{v - v_1}{v - v_2} f_2$$

Jawab : d

UAN 2004/2005

Contoh 2.15

Sebuah kereta bergerak menjauhi stasiun dengan kelajuan 72 km/jam sambil membunyikan peluit dengan frekuensi 720 Hz. Diketahui cepat rambat bunyi di udara 340 m/s. Tentukan frekuensi yang diterima pengamat jika pengamat itu

- sedang duduk di stasiun,
- bergerak mengejar kereta dengan kelajuan 36 km/jam, dan
- bergerak berlawanan dengan arah kereta dengan kelajuan 36 km/jam (saling menjauhi).

Jawab

Diketahui: cepat rambat bunyi $v = 340$ m/s.

- Kereta (sumber bunyi) menjauhi pengamat dengan kelajuan 72 km/jam maka $v_s = 72$ km/jam = 20 m/s (positif). Oleh karena pengamat diam, $v_p = 0$, maka

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} + 0 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}} \right) (720 \text{ Hz}) = 680 \text{ Hz.}$$

- Pengamat bergerak mengejar kereta (mendekati sumber), $v_p = 36$ km/jam = 10 m/s (positif), maka

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} + 10 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}} \right) (720 \text{ Hz}) = 700 \text{ Hz.}$$

- Pengamat menjauhi kereta, $v_p = -10$ m/s, maka

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s = \left(\frac{340 \text{ m/s} - 10 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}} \right) (720 \text{ Hz}) = 660 \text{ Hz.}$$

8. Gelombang Kejut

Pernahkah Anda melihat perahu yang bergerak dengan kecepatan tinggi di atas permukaan air? Ketika perahu bergerak, gelombang air terbentuk. Saat kecepatan perahu lebih besar daripada kecepatan gelombang air laut, akan terlihat muka gelombang seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.9**. Peristiwa ini merupakan analogi dari proses terjadinya gelombang kejut.



Sumber: www.istockphoto.com

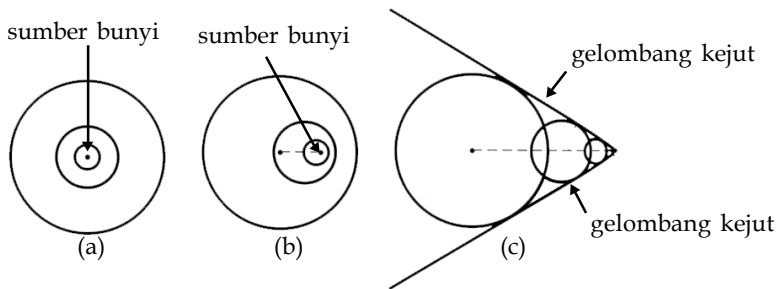
Gambar 2.9

Perahu yang bergerak cepat akan menghasilkan gelombang kejut pada air.

Kata Kunci

- Gelombang kejut
- Ultrasonik

bergeser dari pusat muka gelombang bunyi yang dihasilkannya mendekati muka gelombangnya, seperti **Gambar 2.10(b)**. Jika kecepatan sumber bunyi lebih besar daripada kecepatan bunyi, sumber bunyi akan berada di luar (di depan) muka gelombang bunyi yang dihasilkan sebelumnya seperti (**Gambar 2.9(c)**). Pada kasus ini, sejumlah muka gelombang berinterferensi dan hasil interferensi maksimumnya disebut gelombang kejut.



Gambar 2.10
Gelombang kejut pada bunyi ketika:
(a) sumber bunyi diam,
(b) kecepatan sumber bunyi lebih rendah daripada kecepatan bunyi, dan
(c) kecepatan sumber bunyi lebih besar daripada kecepatan bunyi.

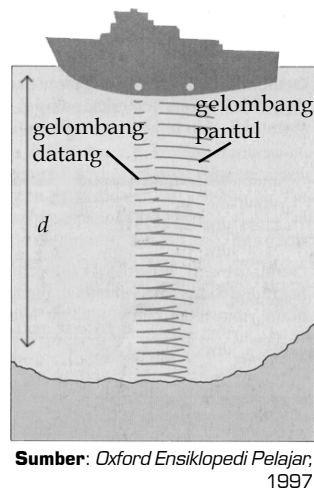
Ketika gelombang kejut yang dihasilkan sumber bunyi melewati pengamat, gelombang ini terdengar sebagai dentuman suara (*sonic boom*). *Sonic boom* memiliki energi yang cukup besar sehingga dapat memecahkan gelas kaca dan kaca jendela rumah Anda.

9. Pemanfaatan Ultrasonik

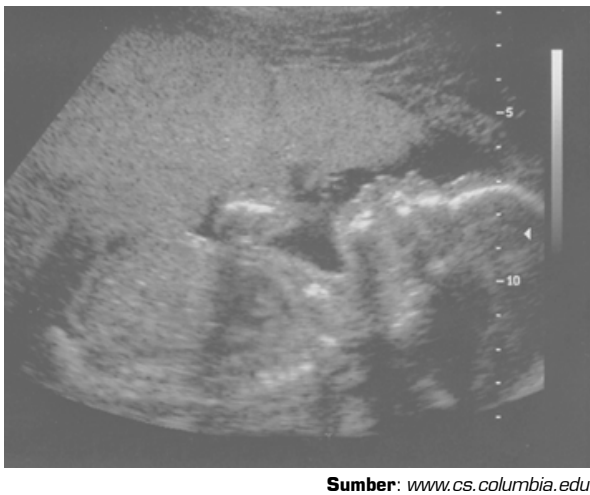
Salah satu manfaat gelombang ultrasonik adalah untuk mengukur kedalaman air laut. Alat ukurnya disebut *pathometer*. Ketika *pathometer* digunakan, gelombang ultrasonik dipancarkan dan pantulannya dari dasar laut diterima kembali seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.11**. Jika kecepatan gelombang dalam air v dan waktu yang diperlukan ultrasonik untuk bolak-balik t , kedalaman laut dapat dihitung dengan persamaan

$$d = \frac{vt}{2} \tag{2-22}$$

Selain itu, ultrasonik juga dimanfaatkan dalam bidang kedokteran. Misalnya, untuk melihat bayi dalam kandungan seorang ibu digunakan metode ultrasonografi atau disingkat USG. **Gambar 2.12** menunjukkan potret seorang bayi dalam kandungan hasil ultrasonografi.



Gambar 2.11
Mengukur kedalaman laut.



Gambar 2.12
Hasil ultrasonografi.

Soal Penguasaan Materi 2.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Faktor-faktor apa sajakah yang memengaruhi kecepatan rambat bunyi pada zat cair dan zat padat?
2. Dawai gitar dengan panjang 30 cm digetarkan sehingga membentuk empat buah simpul. Frekuensi nada yang dihasilkannya adalah 150 Hz. Massa jenis linear dawai 2 g/cm. Tentukan:
 - a. panjang gelombang yang dihasilkan,
 - b. cepat rambat gelombang dalam dawai, dan
 - c. gaya tegangan dawai.
3. Taraf intensitas yang dihasilkan seekor lebah pada jarak 1 m adalah 10 dB. Tentukan:
 - a. intensitas bunyi pada jarak tersebut, dan
 - b. taraf intensitas yang dihasilkan 100 ekor tawon pada jarak 10 m.
4. Dua sumber bunyi satu sama lain terpisah pada jarak 10 m menghasilkan bunyi dengan frekuensi 680 Hz. Cepat rambat bunyi di udara 340 m/s. Tentukan selisih lintasan bunyi yang menghasilkan
 - a. interferensi maksimum, dan
 - b. interferensi minimum.
5. Sebuah truk bergerak dengan kecepatan 36 km/jam di belakang sepeda motor. Ketika truk membunyikan klakson dengan frekuensi 1.000 Hz, pengemudi sepeda motor membaca speedomernya pada angka 72 km/jam. Jika cepat rambat bunyi di udara sebesar 340 m/s, berapakah frekuensi bunyi klakson yang terdengar pengemudi sepeda motor.
6. Bunyi ultrasonik digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Pulsa ultrasonik dipancarkan dari permukaan laut dan 5 sekon kemudian pantulannya diterima kembali. Jika cepat rambat ultrasonik di dalam air 1.440 m/s, berapakah kedalaman laut tersebut?

B Cahaya sebagai Gelombang

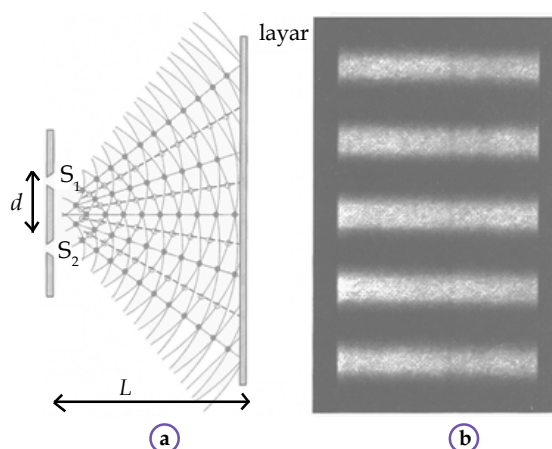
Pada subbab ini, Anda akan mempelajari tentang fenomena-fenomena yang menunjukkan bahwa cahaya bersifat sebagai gelombang. Fenomena-fenomena tersebut, di antaranya interferensi, difraksi, dan polarisasi.

1. Interferensi pada Celah Ganda Young

Interferensi cahaya adalah perpaduan antara dua gelombang cahaya. Dua gelombang cahaya yang berinterferensi harus *koheren*, yakni memiliki amplitudo dan panjang gelombang sama, serta beda fase tetap. Melalui percobaan interferensi cahaya, dapat diukur atau ditentukan panjang gelombang cahaya.

Untuk mendapatkan dua sumber cahaya yang koheren, **Thomas Young** menggunakan sebuah sumber cahaya yang dilewatkan pada dua celah sempit S_1 dan S_2 , seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.13**.

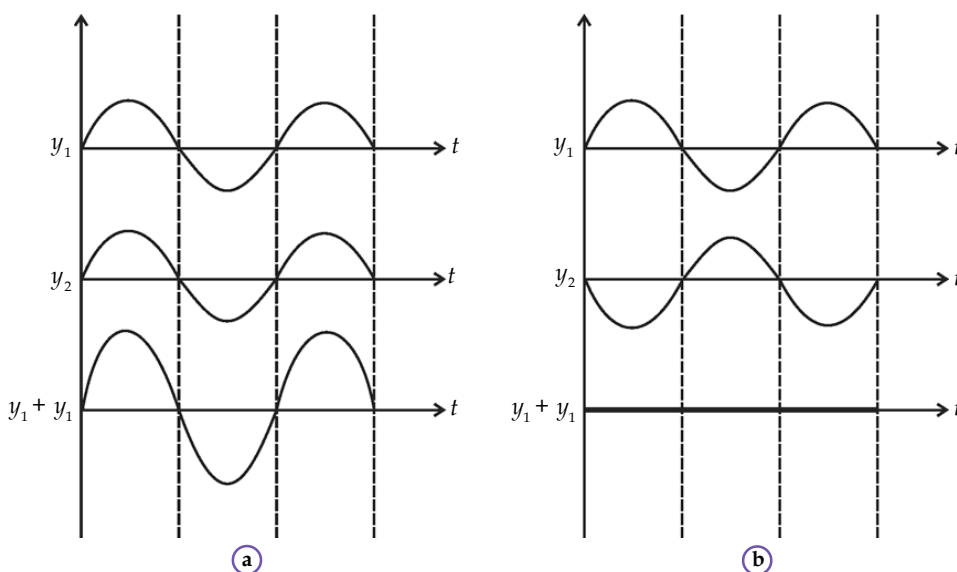
Gambar 2.13
Interferensi Young
(a) skema celah dan layar, dan
(b) pola hasil interferensi.



Sumber: www.cs.tonydude.net

Jarak antara dua celah adalah d . Di belakang celah, sejauh L , diletakkan layar yang berfungsi untuk menangkap pola hasil interferensi. Ternyata pada layar muncul pola atau pita terang dan gelap berselang-seling dengan bagian tengah atau pusat terang.

Bagaimanakah pola interferensi tersebut terjadi? Perhatikan **Gambar 2.13(a)**. Cahaya yang memasuki dua celah akan tersebar ke segala arah. Dengan kata lain, kedua celah seakan bertindak sebagai dua buah sumber cahaya baru. Ketika gelombang cahaya dari S_1 dan S_2 bertemu di tengah-tengah layar, kedua gelombang tersebut menempuh panjang lintasan yang sama sehingga keduanya sefase, yaitu puncak gelombang pertama tiba bersamaan dengan puncak gelombang kedua. Akibatnya, terbentuk gelombang yang amplitudonya menjadi lebih besar, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.14(a)**. Hal tersebut merupakan interferensi yang saling menguatkan (interferensi konstruktif/maksimum) dan hasilnya berupa pita terang pada layar. Interferensi maksimum juga terjadi ketika selisih lintasan dua gelombang merupakan kelipatan dari panjang gelombangnya $(0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots)$.



Gambar 2.14

Interferensi (a) saling menguatkan dan (b) saling melemahkan.

Di lain pihak, ketika dua gelombang yang bertemu memiliki fase berlawanan (**Gambar 2.14(b)**), amplitudo hasil interferensinya nol. Interferensi seperti ini disebut interferensi saling melemahkan (interferensi destruktif/minimum) dan hasilnya berupa pita gelap pada layar. Interferensi minimum terjadi jika selisih lintasan kedua gelombang kelipatan bilangan

ganjil dari setengah panjang gelombangnya $\left(\frac{1}{2}, \lambda, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots\right)$.

Untuk menentukan secara tepat posisi pita terang dan gelap pada layar, perhatikan kembali **Gambar 2.13**. Selisih lintasan antara dua gelombang secara matematis adalah $d \sin \theta$. Dengan demikian, pita terang (interferensi konstruktif) terjadi apabila

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (2-23)$$

dengan $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan pita terang pusat (orde ke-0), terang orde ke-1, 2, 3, ...

Kata Kunci

- Cahaya sebagai gelombang
- Interferensi cahaya
- Interferensi oleh celah ganda Young

Jelajah Fisika

**Thomas Young
(1773-1829)**



Pada 1801, seorang pakar Fisika Inggris, Thomas Young, melakukan percobaan untuk menyelidiki akibat yang terjadi jika cahaya Matahari melewati dua celah yang berdampingan lalu menimpa layar. Young menemukan bahwa jika celah-celah tersebut lebar dan saling berjauhan, terlihat dua berkas cahaya yang tumpang tindih. Namun, jika celah-celah itu sempit dan berdekatan, akan diperoleh pita-pita warna yang disebut "tepi interferensi" (*interference fringes*).

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Sementara itu, pita gelap akan terjadi apabila

$$d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2-24)$$

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan gelap orde ke-1, 2, 3, ...

Untuk θ yang sangat kecil, $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{p}{L}$ sehingga

$$d \sin \theta \approx \frac{dp}{L} \quad (2-25)$$

dengan p = jarak terang atau gelap orde ke- m dari terang pusat. Dengan demikian, **Persamaan (2-23)** dapat ditulis menjadi

$$\frac{dp}{L} = m\lambda \quad (2-26)$$

dan **Persamaan (2-24)** menjadi

$$\frac{dp}{L} = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2-27)$$

Contoh 2.16

Cahaya monokromatik dilewatkan pada dua celah sempit yang berjarak 0,1 mm. Pola interferensi ditangkap dengan layar yang berjarak 1,2 m dari celah. Jika panjang gelombang cahaya 5.000 Å, tentukan:

- jarak pita terang orde ke-2, dari terang pusat,
- jarak pita gelap orde ke-2 dari terang pusat, dan
- jarak antara kedua pita tersebut.

Jawab

Diketahui: $d = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ cm}$, $L = 1,20 \text{ m}$, dan $\lambda = 5.000 \text{ Å} = 5.000 \times 10^{-10} \text{ m}$.
Gunakan **Persamaan (2-26)** dan **(2-27)** sebagai berikut.

- Jarak pita terang ke-2 dari terang pusat

$$\frac{dp}{L} = m\lambda \rightarrow p = \frac{Lm\lambda}{d} = \frac{(1,20)(2)(5.000 \times 10^{-10} \text{ m})}{(10^{-4} \text{ m})} = 12 \times 10^{-3} \text{ m} = 12 \text{ mm}.$$

- Jarak pita gelap ke-2 dari terang pusat

$$\begin{aligned} \frac{dp}{L} &= \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda \rightarrow p = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{L\lambda}{d} \\ &= \left(2 - \frac{1}{2}\right) \frac{(1,2 \text{ m})(5.000 \times 10^{-10} \text{ m})}{(10^{-4} \text{ m})} \\ &= 9 \times 10^{-3} \text{ m} = 9 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Dari jawaban (a) dan (b) diperoleh jarak antara kedua pita (terang ke-2 dan gelap ke-2)

$$\Delta p = 12 - 9 = 3 \text{ mm}.$$

Catatan: Jarak antara pita terang dan pita gelap yang berdekatan dapat juga dicari menggunakan persamaan $\Delta p = \frac{L\lambda}{2d}$. Silakan Anda coba menjawab soal (c) menggunakan persamaan tersebut.

Contoh 2.17

Berkas cahaya putih dilewatkan pada dua celah yang terpisah pada jarak 0,5 mm. Pola interferensi diamati pada layar yang berjarak 2,5 m dari celah. Pita terang orde pertama berupa pelangi dengan merah dan ungu pada kedua tepinya. Jika panjang gelombang cahaya merah dan ungu masing-masing 700 nm dan 400 nm, tentukan lebar spektrum (pelangi) orde pertama tersebut.

Jawab

Diketahui: $d = 0,5 \text{ mm} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}$, $L = 2,5 \text{ m}$, $\lambda_m = 700 \text{ nm} = 700 \times 10^{-9} \text{ m}$ (merah), dan $\lambda_u = 400 \text{ nm} = 400 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Lebar spektrum adalah selisih antara jarak cahaya merah dan ungu ke terang pusat (putih). Pada layar, selisih jarak pita terang ke terang pusat (Δp) terjadi karena ada

perbedaan panjang gelombang ($\Delta \lambda$). Dengan demikian, dari persamaan $\frac{dp}{L} = m\lambda$,

untuk pita terang, dapat diperoleh

$$\frac{d\Delta p}{L} = m\Delta \lambda \rightarrow \Delta p = \frac{mL}{d} \Delta \lambda = \frac{(1)(2,5 \text{ m})}{(5,0 \times 10^{-4} \text{ m})} [(700 \times 10^{-9} \text{ m}) - (400 \times 10^{-9} \text{ m})]$$

$$\Delta p = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Jadi, lebar spektrum orde ke-1 adalah $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$ atau 1,5 mm.

2. Interferensi oleh Lapisan Tipis

Pernahkah Anda memerhatikan gelembung sabun atau lapisan minyak di atas air yang terkena sinar matahari? Pada gelembung sabun atau lapisan minyak di atas air, ketika terkena sinar Matahari, akan tampak cahaya warna-warni. Pada kasus ini, warna cahaya yang terlihat merupakan hasil interferensi konstruktif antara cahaya yang dipantulkan oleh kedua permukaan lapisan tipis.

Untuk mengetahui bagaimana peristiwa tersebut terjadi, tinjau lapisan tipis minyak di atas permukaan air seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.15**. Sinar-sinar yang jatuh ke permukaan minyak di titik A akan mengalami pemantulan dan pembiasan. Sinar yang dibiaskan pada minyak mengenai bidang batas antara minyak dan air di titik B, ada yang dipantulkan dan ada pula yang dibiaskan. Sinar yang dipantulkan oleh permukaan air mengenai bidang batas minyak dan udara di titik C sehingga mengalami pemantulan dan pembiasan lagi. Sinar yang dibiaskan dari titik C kemudian bertemu dengan sinar yang dipantulkan pertama kali dari titik A sehingga terjadilah interferensi.

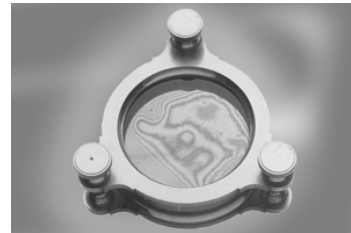
Ketika sinar dalam lapisan minyak mengenai bidang batas minyak dan air, sinar yang dipantulkan mengalami perubahan fase $\frac{1}{2}$ (berlawanan fase).

Akibatnya, sinar yang berinterferensi memiliki beda fase $\frac{1}{2}$. Dengan demikian, interferensi maksimum terjadi jika selisih lintasan optik kedua sinar adalah $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$. Sebaliknya, interferensi minimum terjadi jika selisih lintasan optiknya $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$, dan seterusnya. Secara matematis, pita terang terjadi jika

$$2nd \cos r = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2-28)$$

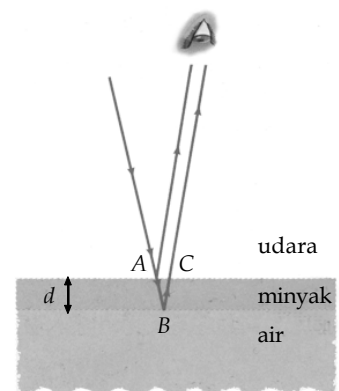
Jelajah Fisika

Cincin Newton



Jika lensa cembung diletakkan di atas pelat kaca yang rata, cahaya dipantulkan oleh pelat tersebut dan juga oleh permukaan bawah lensa. Kedua kelompok cahaya tersebut saling "mengganggu" atau saling menginterferensi sehingga terlihatlah pola interferensi yang dikenal dengan nama "cincin-cincin Newton" karena yang kali pertama menyelidikinya adalah Isaac Newton (1642–1727).

Sumber: Jendela Iptek, 1997



Gambar 2.15

Interferensi pada lapisan tipis.

dengan: d = tebal lapisan,
 n = indeks bias lapisan, dan
 r = sudut bias.

Nilai $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan pita terang pusat (orde ke-0), terang orde ke-1, 2, 3, dan seterusnya. Sementara itu, pita gelap terjadi jika

$$2nd \cos r = m\lambda \quad (2-29)$$

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan pita gelap orde ke-1, 2, 3, dan seterusnya. **Gambar 2.16** memperlihatkan beberapa contoh interferensi oleh lapisan tipis.

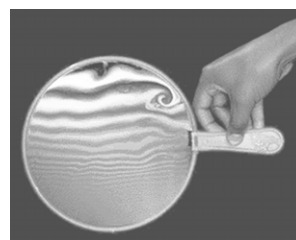
Gambar 2.16

Contoh interferensi oleh lapisan tipis pada:
 (a) gelembung air sabun, dan
 (b) lapisan air sabun.



(a)

Sumber: Jendela IPTEK, 1997



(b)

Sumber: www.exploratorium.edu

Contoh 2.18

Sebuah lapisan tipis memancarkan sinar hijau yang panjang gelombangnya 540 nm. Jika indeks bias lapisan 1,35, berapa ketebalan minimum lapisan tipis tersebut?

Jawab

Diketahui: $\lambda = 540 \text{ nm}$ dan $n = 1,35$.

Munculnya sinar hijau menunjukkan bahwa sinar hijau mengalami interferensi maksimum. Dari **Persamaan (2-24)** dapat diperoleh tebal lapisan, yaitu

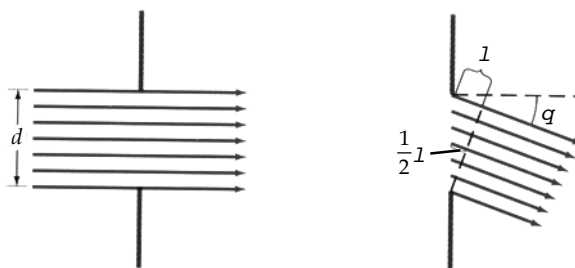
$$d = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda}{2n \cos r}.$$

Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh bahwa d akan minimum jika $m = 0$ dan $\cos r = 1$ sehingga tebal minimum lapisan adalah

$$d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{540 \text{ nm}}{4(1,35)} = 100 \text{ nm}.$$

3. Difraksi oleh Celah Tunggal

Difraksi atau lenturan cahaya terjadi ketika berkas cahaya melewati celah sempit atau penghalang. Mirip dengan interferensi oleh celah ganda Young, difraksi cahaya oleh celah tunggal akan menghasilkan pola terang-gelap berselang-seling pada layar yang berada di belakang celah.



Gambar 2.17

Difraksi cahaya oleh celah tunggal.

Untuk melihat bagaimana pola terang dan gelap muncul akibat difraksi cahaya, tinjaulah berkas sinar sejajar yang melewati celah sempit seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.17**. Misalnya, sinar dibelokkan dengan sudut θ sehingga selisih lintasan sinar dari atas celah dan dari bawah celah tepat sama dengan panjang gelombangnya. Sinar yang melewati bagian tengah celah dan yang melewati bagian atas celah akan berselisih lintasan setengah panjang gelombangnya. Demikian pula antara sinar yang melewati bagian tengah celah dan sinar yang melewati bagian bawah celah, keduanya berselisih lintasan setengah panjang gelombangnya. Kedua sinar tersebut akan berlawanan fase ketika tiba di layar sehingga akan menghasilkan interferensi minimum (pola gelap).

Dari **Gambar 2.17**, terlihat bahwa $\lambda = d \sin \theta$ berlaku untuk interferensi minimum pertama. Secara umum, diperoleh bahwa pola gelap (minimum) pada layar akibat difraksi oleh celah tunggal memenuhi persamaan

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (2-30)$$

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$. Dalam hal ini, pola gelap tidak terjadi pada $m = 0$ karena di bagian tengah terjadi terang. Di antara minimum, terang dengan intensitas lebih rendah terjadi dan memenuhi persamaan

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2-31)$$

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$. Untuk θ yang sangat kecil, $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{P}{L}$ sehingga

$$d \sin \theta \approx \frac{dp}{L} \quad (2-32)$$

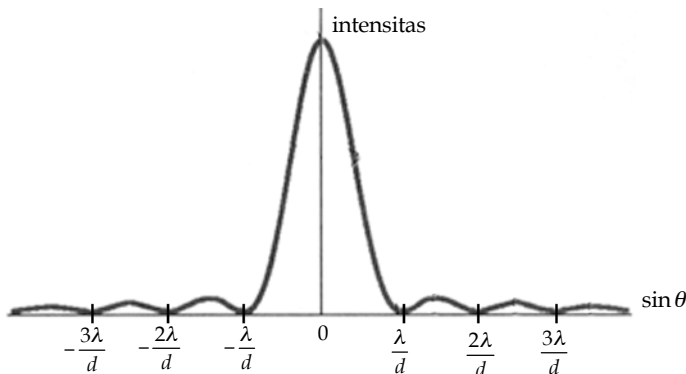
dengan p = jarak terang atau gelap orde ke- m dari terang pusat. Dengan demikian, **Persamaan (2-30)** dapat ditulis menjadi

$$\frac{dp}{L} = m \lambda \quad (2-33)$$

dan **Persamaan (2-31)** menjadi

$$\frac{dp}{L} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2-34)$$

Grafik intensitas cahaya dalam pola difraksi oleh celah tunggal sebagai fungsi $\sin \theta$ ditunjukkan pada **Gambar 2.18**. Perhatikan bahwa terang pusat (di tengah-tengah) tidak saja memiliki intensitas yang lebih tinggi, tetapi lebarnya pun menjadi dua kali dari lebar terang lainnya.



Kata Kunci

- Difraksi oleh celah tunggal
- Interferensi oleh lapisan tipis

Gambar 2.18

Grafik intensitas pola difraksi terhadap $\sin \theta$.

Contoh 2.19

Sebuah celah lebarnya d disinari cahaya dan menghasilkan pola terang-gelap pada layar. Berapakah harga d minimum untuk cahaya merah yang memiliki panjang gelombang 650 nm jika sudut jatuhnya 30° ?

Jawab

Diketahui: $\lambda = 650$ nm dan $\theta = 30^\circ$.

Oleh karena warna merah berarti terang, dari **Persamaan (2-31)** terlihat bahwa d minimum jika $m = 0$. Dengan demikian, diperoleh

$$d = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda}{\sin \theta} = \frac{\left(0 + \frac{1}{2}\right)(650 \text{ nm})}{\sin 30^\circ} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)(650 \text{ nm})}{\frac{1}{2}} = 650 \text{ nm}.$$

Contoh 2.20

Seberkas cahaya sejajar mengenai tegak lurus sebuah celah yang lebarnya 0,4 mm. Di belakang celah ditempatkan lensa positif dengan jarak titik api 40 cm. Garis terang pusat dan garis gelap pertama pada layar di bidang titik api lensa berjarak 0,56 mm. Tentukan panjang gelombang cahaya tersebut.

Jawab

Diketahui: $d = 0,4$ mm = 4×10^{-4} m, $L = 40$ cm = 4×10^{-1} m (layar tepat berada di bidang titik api lensa), dan jarak gelap ke-1 ($m = 1$) dari terang pusat $p = 0,56$ mm = $5,6 \times 10^{-4}$ m. Dari **Persamaan (2-33)** diperoleh

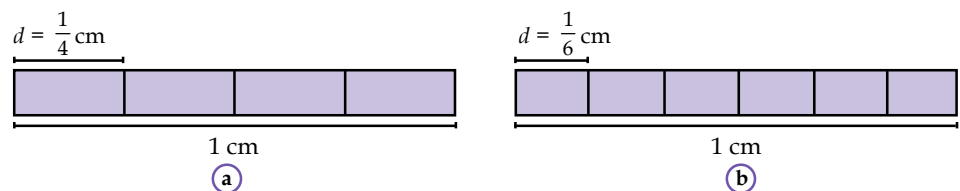
$$\lambda = \frac{dp}{mL} = \frac{(4 \times 10^{-4} \text{ m})(5,6 \times 10^{-4} \text{ m})}{(1)(4 \times 10^{-1} \text{ m})} = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

4. Difraksi oleh Kisi

Kisi adalah sejumlah celah sempit sejajar dan terpisah dengan jarak yang sama. Kisi dapat dibuat dengan cara menggores pelat logam dengan ujung sebuah intan sedemikian rupa sehingga membentuk garis-garis sejajar berjarak sama satu sama lain. Bagian logam yang tergores sebagai celah kisi difraksi pertama kali dibuat oleh Fraunhofer dengan menggunakan kawat-kawat halus.

Gambar 2.19

Kisi difraksi pada pelat logam untuk:
(a) 3 buah celah, dan
(b) 5 buah celah.

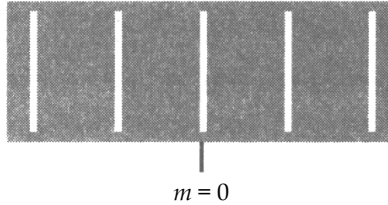
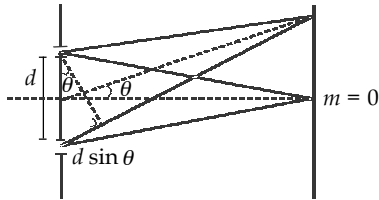


Untuk menentukan jarak antarcelah, perhatikan **Gambar 2.19**. Jika dalam pelat logam selebar 1 cm diberi 3 buah garis, terbentuklah 3 buah celah sehingga jarak antarcelah sama dengan $\frac{1}{4}$ cm. Ketika jumlah garisnya ada 5, terbentuklah 5 buah celah sehingga jarak antarcelahnya $\frac{1}{6}$ cm (**Gambar 2.19(b)**). Jadi, jika dibuat N garis, akan terbentuk N buah celah. Jumlah celah yang dibuat biasanya berorde ribuan. Sehingga jarak antarcelahnya memenuhi persamaan

$$d = \frac{1}{N}$$

(2-35)

dengan N = jumlah garis tiap cm.



Gambar 2.20

Difraksi pada kisi.

Pola terang-gelap yang terbentuk di layar akibat difraksi oleh kisi sama dengan pola hasil interferensi pada celah ganda Young, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.20**. Oleh karena itu, persamaan pola difraksi oleh kisi sama dengan persamaan pola interferensi celah ganda Young. Berdasarkan **Persamaan (2-23)** hingga **(2-27)**, untuk pita terang diperoleh

$$d \sin \theta = m\lambda$$

(2-36)

dengan $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan pita terang pusat (orde ke-0), terang orde ke-1, 2, 3, dan seterusnya. Sementara itu, untuk pita gelap,

$$d \sin \theta = (m - \frac{1}{2})\lambda$$

(2-37)

dengan $m = 1, 2, 3, \dots$, berkaitan dengan gelap orde ke-1, 2, 3, dan seterusnya. Untuk sudut θ yang sangat kecil, pita terang terjadi jika

$$\frac{dp}{L} = m\lambda$$

(2-38)

dan pita gelap,

$$\frac{dp}{L} = (m - \frac{1}{2})\lambda$$

(2-39)

Contoh 2.21

Seberkas cahaya jatuh tegak lurus pada kisi yang terdiri atas 5.000 garis tiap cm. Sudut difraksi terang orde ke-2 adalah 30° . Tentukan panjang gelombang cahaya tersebut.

Jawab

Diketahui: $N = 5.000$ garis/cm, terang dengan $m = 2$, dan $\theta = 30^\circ$.

Jarak antarcelahnya adalah

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1}{5.000} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm.}$$

Dari **Persamaan (2-36)**, diperoleh

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} = \frac{(2 \times 10^{-4} \text{ cm})(\sin 30^\circ)}{2} = \frac{(2 \times 10^{-4} \text{ cm})(\frac{1}{2})}{2} = 5 \times 10^{-5} \text{ cm} = 5.000 \text{ \AA}.$$

Jelajah Fisika

Kisi Difraksi



Kisi difraksi, seperti terlihat pada gambar, adalah sisipan kecil yang terbuat dari kaca dan memiliki banyak celah irisan sempit cahaya. Gelombang-gelombang cahaya yang tersebar akan saling menginterferensi sehingga menimbulkan alur-alur warna. Pada kisi difraksi yang lazim dijumpai, terdapat 300 celah irisan dalam setiap sentimeter (sekitar 7.500 irisan dalam setiap inci), dan celah-celah itu diatur dengan saksama sehingga jarak antarcelah persis sama.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Contoh 2.22

Ajeng melakukan percobaan untuk menentukan panjang gelombang sebuah sinar dengan menggunakan kisi difraksi. Sumber cahaya, kisi, dan layar diatur pada jarak tertentu yang tetap. Pertama-tama, Ajeng menggunakan sinar ungu ($\lambda = 400 \text{ nm}$) sebagai acuan. Ternyata, jarak pita pertama sinar ungu dari terang pusat adalah 3 mm. Selanjutnya, Ajeng menggunakan sinar yang akan ia tentukan panjang gelombangnya. Ternyata, jarak pita pertama sinar tersebut dari terang pusat adalah 4,5 mm. Tentukan panjang gelombang sinar yang diukur Ajeng.

Jawab

Diketahui: untuk sinar ungu $\lambda_u = 400 \text{ nm}$, $p_u = 3 \text{ mm}$, dan untuk sinar yang diukur Ajeng $p_a = 4,5 \text{ mm}$.

Dari **Persamaan (2-38)**, untuk d , m , dan L yang tetap, panjang gelombang cahaya yang digunakan sebanding dengan jarak pita terang pertama ke terang pusat ($\lambda \sim p$) maka

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_u} = \frac{p_a}{p_u}$$

sehingga diperoleh

$$\lambda_a = \frac{p_a}{p_u} \lambda_u = \left(\frac{4,5 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} \right) (400 \text{ nm}) = 600 \text{ nm}.$$

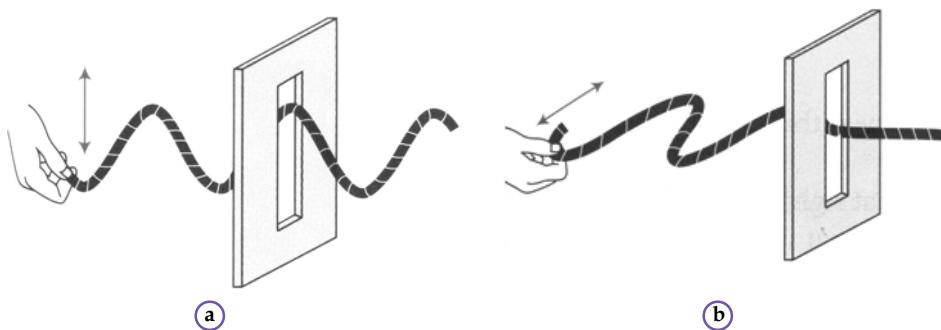
5. Polarisasi Cahaya

Pernahkah Anda menggunakan kacamata hitam? Dapatkah Anda membedakan intensitas atau tingkat kecerahan cahaya sebelum dan sesudah menggunakan kacamata? Ketika menggunakan kacamata, Anda akan mendapatkan cahaya di sekeliling Anda menjadi lebih redup. Kenyataan tersebut terjadi karena cahaya yang mengenai mata telah terpolarisasi oleh kacamata hitam Anda.

Polarisasi adalah peristiwa terserapnya sebagian atau seluruh arah getar gelombang. Berbeda dengan interferensi dan difraksi yang dapat terjadi baik pada gelombang transversal maupun longitudinal, polarisasi hanya terjadi pada gelombang transversal. Untuk memahami peristiwa ini, perhatikan **Gambar 2.21**.

Gambar 2.21

Polarisasi gelombang yang
(a) terpolarisasi seluruhnya, dan
(b) tidak terpolarisasi.



Sumber: Contemporary College Physics, 1993

Ketika arah getar gelombang tali sejajar dengan sumbu polarisator (bayangkan sebagai sebuah pintu terbuka), seluruh arah getar gelombang akan diserap (**Gambar 2.21(a)**). Akan tetapi, ketika arah getar gelombang tegak lurus dengan sumbu polarisator, tidak ada arah getar yang diserap (**Gambar 2.21(b)**).

a. Polarisasi Cahaya karena Pemantulan dan Pembiasan

Polarisasi cahaya dapat terjadi akibat pemantulan dan pembiasan cahaya. Ketika cahaya jatuh pada bidang batas antara dua medium dengan membentuk sudut i terhadap garis normal, sebagian sinar akan dipantulkan dengan sudut i dan sebagian lagi dibiaskan dengan sudut bias r . Jika sinar bias dan sinar pantul membentuk sudut 90° (atau secara matematis $i_p + r = 90^\circ$), sinar pantul terpolarisasi linear. Sudut datang yang menghasilkan sinar pantul terpolarisasi linear disebut *sudut polarisasi* atau *sudut Brewster* (i_p). Selanjutnya, Hukum Snellius untuk pembiasan menyatakan bahwa

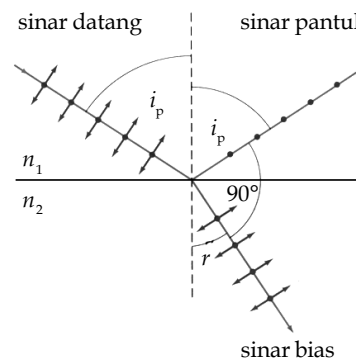
$$\frac{\sin i_p}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Oleh karena $r = 90^\circ - i_p$, $\sin r = \sin(90^\circ - i_p) = \cos i_p$, dan dengan mengingat

bahwa $\frac{\sin i_p}{\cos i_p} = \tan i_p$, Hukum Snellius di atas menjadi

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-40)$$

dengan: n_1 = indeks bias medium pihak sinar datang, dan
 n_2 = indeks bias medium pihak sinar bias.



Gambar 2.22

Polarisasi linear terjadi jika sinar bias dan sinar pantul membentuk sudut 90° .

Contoh 2.23

Tentukan sudut datang dan sudut bias yang terbentuk jika cahaya Matahari yang dipantulkan oleh permukaan air terpolarisasi linear. ($n_{\text{air}} = \frac{4}{3}$).

Jawab

Diketahui: $n_1 = 1$ (sinar datang dari udara) dan $n_2 = \frac{4}{3}$.

Dengan menggunakan **Persamaan (2-40)** maka

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\left(\frac{4}{3}\right)}{1} = \frac{4}{3}$$

sehingga diperoleh $i_p = 53^\circ$.

Adapun sudut biasnya adalah

$$r = 90^\circ - i_p = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ.$$

b. Polarisasi karena Serapan Selektif

Cahaya terpolarisasi dapat juga diperoleh dari sinar tak terpolarisasi dengan menggunakan kristal tertentu, seperti nikel atau dikenal dengan pelat tipis polaroid. Polaroid memiliki sederetan celah paralel (disebut sumbu polarisator) sehingga hanya arah getar cahaya yang sejajar celah yang akan lolos dari polaroid itu. Jika arah getar membentuk sudut θ terhadap sumbu polarisator, amplitudo getaran berkurang dengan faktor $\cos \theta$, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.23**. Oleh karena intensitas cahaya sebanding dengan kuadrat amplitudonya, intensitas sinar yang telah melewati polaroid menjadi

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2-41)$$

dengan: I_0 = intensitas cahaya yang datang, dan

θ = sudut antara sumbu polarisator dan arah getar gelombang tak terpolarisasi.

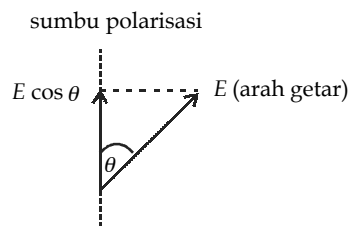
Kata Kunci

- Difraksi oleh kisi
- Hukum Snellius
- Polarisasi cahaya
- Polarisasi karena hamburan
- Polarisasi karena pemantulan dan pembiasan
- Polarisasi karena serapan selektif
- Sudut Brewster



Gambar 2.23

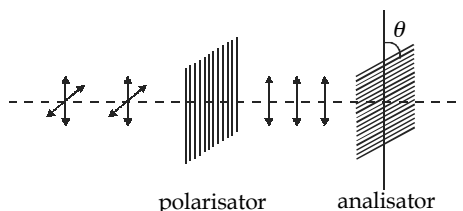
Polaroid hanya akan meneruskan komponen arah getar yang sejajar dengan sumbu polarisatornya.



Dua buah polaroid dapat digunakan untuk mengubah-ubah intensitas sinar yang diteruskan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.24**.

Gambar 2.24

Polarisasi cahaya oleh dua buah polaroid.



Polaroid pertama digunakan sebagai polarisator dan yang kedua sebagai analisisator. Oleh karena arah getar cahaya dapat dipandang terdiri atas dua komponen yang saling tegak lurus, ketika ia dilewatkan pada polarisator, arah getar yang sejajar sumbu polarisator akan diteruskan dan arah getar yang tegak lurus sumbu polarisator akan diserap. Dengan demikian, intensitas cahaya yang dilewatkan polarisator adalah $\frac{1}{2} I_0$. Jika sumbu analisisator membentuk sudut θ terhadap sumbu polarisator, sesuai **Persamaan (2-41)**, intensitas cahaya yang diteruskan analisisator adalah

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta \quad (2-42)$$

Contoh 2.24

Dua sumbu polaroid membentuk sudut 60° satu sama lain. Berapa persen cahaya yang diteruskan kedua polaroid?

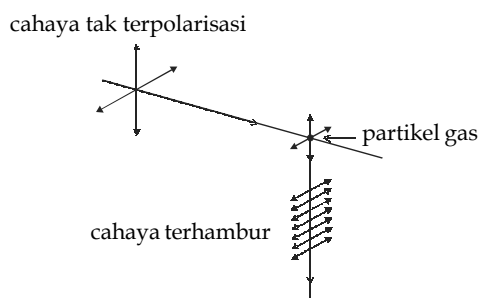
Jawab

Dengan menggunakan **Persamaan (2-42)** maka perbandingan intensitas cahaya yang diteruskan dan intensitas awalnya adalah

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \cos^2 60^\circ = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0,125 = 12,5\%.$$

c. Polarisasi karena Hamburan

Polarisasi juga dapat terjadi karena hamburan. Jika cahaya tak terpolarisasi mengenai partikel-partikel gas, cahaya yang terhambur tegak lurus dengan arah semula akan terpolarisasi sebagian atau seluruhnya. **Gambar 2.25** menunjukkan polarisasi karena hamburan.



Gambar 2.25

Polarisasi cahaya karena hamburan.

Fenomena menarik dari peristiwa hamburan adalah langit yang tampak berwarna biru. Fenomena ini terjadi karena kuantitas cahaya yang dihamburkan bergantung pada panjang gelombang cahaya tersebut. Semakin besar panjang gelombang cahaya, semakin sedikit cahaya yang dihamburkan oleh molekul udara. Cahaya merah dan jingga memiliki panjang gelombang lebih besar daripada cahaya biru dan ungu sehingga cahaya merah dan jingga dihamburkan lebih sedikit daripada cahaya biru dan ungu. Itulah sebabnya mengapa langit tampak berwarna biru.

Soal Penguasaan Materi 2.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Cahaya dengan panjang gelombang 680 nm, jatuh pada dua celah sempit yang terpisah pada jarak 0,05 mm. Pola interferensi ditangkap pada layar sejauh 1 m dari celah.
 - Tentukan jarak antara dua pita terang yang berdekatan.
 - Berapa jarak antara pita terang kedua dan pita keempat?
- Lapisan tipis sabun dengan ketebalan 120 nm dijatuhkan cahaya tegak lurus permukaan lapisan. Jika indeks bias sabun 1,34, berapakah panjang gelombang cahaya yang terlihat di tengah-tengah?
- Cahaya dengan panjang gelombang $5.000\text{\AA}$ melewati sebuah celah yang lebarnya $1,0\text{ }\mu\text{m}$. Pola terang gelap ditangkap pada layar sejauh 30 cm dari celah. Tentukan lebar pita terang pusat. Lebar pita terang pusat sama dengan jarak antara pita gelap pertama sebelah atas dan pita gelap pertama sebelah bawah.
- Cahaya hijau ($\lambda = 500\text{ nm}$) jatuh tegak lurus kisi. Ternyata, pita terang orde kedua terjadi pada sudut difraksi 30° . Berapakah jumlah garis pada kisi tiap sentimeternya?
- Tentukan sudut antara sumbu polarisator dan analisator supaya intensitas sinar yang diteruskan berkurang 75%.

Pembahasan Soal SPMB

Sebuah celah sempit tunggal dengan lebar a disinari oleh cahaya manokromatis dengan panjang gelombang $5.890\text{ \AA}$. Lebar celah agar terjadi pola difraksi maksimum orde pertama pada sudut 30° adalah

- $5.890\text{ \AA}$
- $11.780\text{ \AA}$
- $17.670\text{ \AA}$
- $23.670\text{ \AA}$
- $29.450\text{ \AA}$

Penyelesaian

$\lambda = 5.890\text{ \AA}$, $\theta = 30^\circ$, dan $m = 1$, dan $d = a$.
difraksi pada celah tunggal adalah

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

$$a \sin 30^\circ = \left(1 + \frac{1}{2}\right) (5.890\text{ \AA})$$

$$a \left(\frac{1}{2}\right) = \left(\frac{3}{2}\right) (5.890\text{ \AA})$$

$$a = 17.670\text{ \AA}$$

Jawab: c

SPMB 2004

Rangkuman

1. **Bunyi** merupakan gelombang longitudinal. Kecepatan rambat bunyi bergantung pada medium yang dilaluinya dan temperatur.
2. Seutas dawai yang digetarkan dan pipa organa yang ditiup akan membentuk pola **gelombang stasioner**. Panjang gelombang dan frekuensi nada yang dihasilkan dawai dan **pipa organa terbuka** memenuhi persamaan

$$\lambda_n = \frac{2L}{n+1}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (n+1) \frac{v}{2L}$$

Adapun untuk **pipa organa tertutup**, yaitu

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n+1}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (2n+1) \frac{v}{4L}$$

3. **Resonansi** adalah peristiwa bergetarnya suatu benda akibat benda lain yang bergetar jika frekuensinya sama.
4. **Intensitas** adalah energi yang dipindahkan tiap satuan luas tiap satuan waktu atau daya yang dipancarkan tiap satuan luas

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi R^2}$$

5. **Taraf intensitas** bunyi adalah logaritma perbandingan intensitas bunyi terhadap intensitas ambang. Intensitas ambang adalah intensitas minimum yang masih dapat didengar manusia.

$$TI = 10 \log \left[\frac{I}{I_0} \right]$$

6. **Interferensi** dua gelombang bunyi akan menghasilkan maksimum dan minimum jika kedua gelombang memiliki amplitudo, panjang gelombang, atau frekuensi yang sama (koheren). **Interferensi maksimum** terjadi jika

$$\Delta x = m\lambda$$

sedangkan **interferensi minimum**

$$\Delta x = \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda$$

7. **Pelayangan bunyi** sama dengan selisih kedua frekuensi bunyi yang berinterferensi

$$\Delta f = |f_1 - f_2|$$

8. **Efek Doppler** adalah peristiwa berubahnya frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar karena adanya perubahan jarak antara sumber bunyi dan pendengar

$$f_p = \frac{v + v_p}{v + v_s} f_s$$

9. **Gelombang kejut** pada bunyi terjadi ketika kecepatan sumber bunyi lebih besar daripada kecepatan bunyi.
10. **Interferensi cahaya** adalah perpaduan antara dua gelombang cahaya yang koheren, yaitu memiliki amplitudo dan panjang gelombang sama, serta beda fase tetap. Interferensi konstruktif pada celah ganda young terjadi apabila

$$d \sin \theta = m\lambda$$

sedangkan interferensi destruktif terjadi apabila

$$d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda$$

11. **Interferensi konstruktif** oleh lapisan tipis terjadi jika

$$2nd \cos r = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

sedangkan **interferensi destruktifnya** terjadi jika

$$2nd \cos r = m\lambda$$

12. Pada difraksi oleh sebuah celah, pola gelap (minimum) memenuhi persamaan

$$d \sin \theta = m\lambda$$

sedangkan pola terang (maksimum) memenuhi persamaan

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

13. **Kisi** adalah sejumlah celah sempit sejajar dan terpisah pada jarak yang sama. Pola terang gelap akibat difraksi oleh kisi sama dengan pola hasil interferensi pada celah ganda Young.
14. **Polarisasi** adalah peristiwa terserapnya sebagian atau seluruh arah gerak gelombang transversal. Intensitas cahaya yang melewati polaroid adalah

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

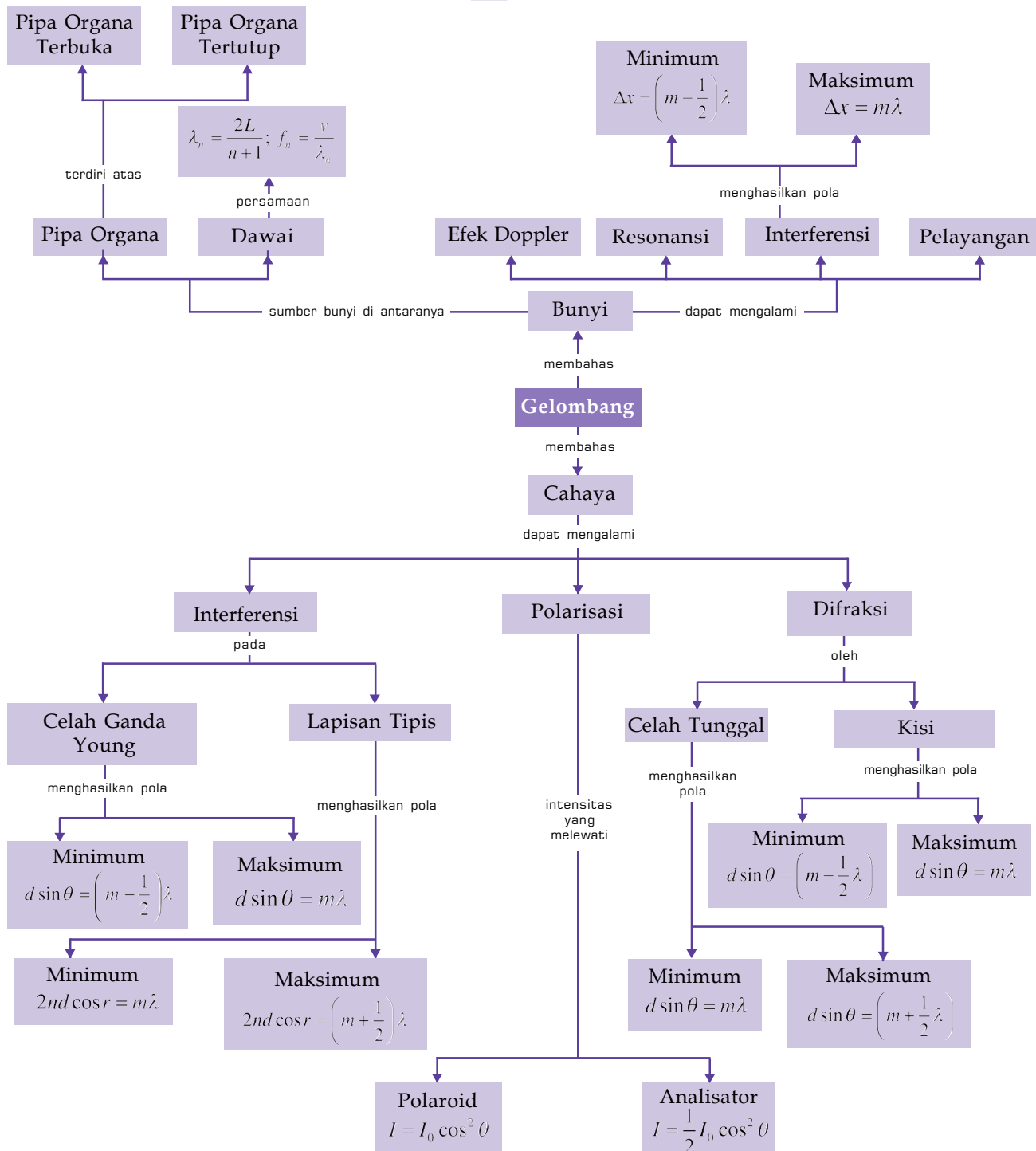
sedangkan intensitas cahaya yang diteruskan analisator adalah

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

15. Pada polarisasi karena pemantulan dan pembiasan

$$i_p + r = 90^\circ \text{ dan } \tan i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Gelombang Bunyi dan Cahaya, Anda dapat mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi dan cahaya, serta menerapkan konsep dan prinsip gelombang bunyi dan cahaya dalam teknologi. Jika Anda belum mampu mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi dan cahaya, serta menerapkan konsep dan prinsip gelombang bunyi dan cahaya

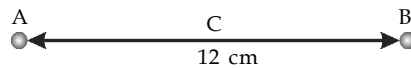
dalam teknologi, Anda belum menguasai materi bab Gelombang Bunyi dan Cahaya dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 2

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

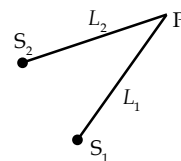
- Jika seutas dawai yang diberi tegangan 100 N digetarkan, frekuensi yang timbul adalah f_0 . Besar tegangan yang dibutuhkan agar dawai tersebut bergetar dengan frekuensi $2f_0$ adalah
 - 25 N
 - 50 N
 - 100 N
 - 200 N
 - 400 N
- Jika piano yang panjangnya 0,5 m dan bermassa 10^{-2} kg ditegangkan 200 N, frekuensi nada dasar dawai piano tersebut adalah
 - 100 Hz
 - 200 Hz
 - 400 Hz
 - 600 Hz
 - 800 Hz
- Sepotong dawai menghasilkan nada dasar f . Jika dipendekkan 8 cm tanpa mengubah tegangan, dihasilkan frekuensi $1,25 f$. Jika dawai dipendekkan 2 cm lagi, frekuensi yang dihasilkan adalah
 - $2 f$
 - $1,5 f$
 - $1,33 f$
 - $1,25 f$
 - f
- Sebuah seruling yang memiliki kolom udara terbuka pada kedua ujungnya memiliki nada atas kedua dengan frekuensi 1.700 Hz. Jika kecepatan suara di udara adalah 340 m/s, panjang seruling tersebut adalah
 - 10 cm
 - 15 cm
 - 20 cm
 - 25 cm
 - 30 cm
- Pada sebuah pipa organa terbuka, nada atas kedua dihasilkan panjang gelombang sebesar x , sedangkan pada pipa organa tertutup nada atas kedua dihasilkan panjang gelombang sebesar y . Jika kedua pipa panjangnya sama, $y : x$ sama dengan
 - 2 : 1
 - 3 : 4
 - 4 : 3
 - 5 : 6
 - 6 : 5
- Pada suatu hari, ketika laju rambat bunyi sebesar 345 m/s, frekuensi dasar suatu pipa organa yang tertutup salah satu ujungnya adalah 220 Hz. Jika nada atas kedua pipa organa tertutup ini panjang gelombangnya sama dengan nada atas ketiga suatu pipa organa yang terbuka kedua ujungnya, panjang pipa organa terbuka itu adalah
 - 37 cm
 - 43 cm
 - 63 cm
 - 75 cm
 - 87 cm
- Sebuah garputala berfrekuensi 660 Hz digetarkan di dekat sebuah tabung berisi air. Jika laju rambat bunyi di udara sebesar 330 m/s, akan terjadi resonansi jika jarak minimum permukaan air dengan ujung tabung adalah
 - 0,125 m
 - 0,25 m
 - 0,5 m
 - 0,625 m
 - 0,75 m

- Perhatikan gambar berikut ini.



A dan B merupakan sumber bunyi yang memancarkan bunyi ke segala arah. Energi bunyi yang dipancarkan A dan B masing-masing 1,2 W dan 0,3 W. Agar intensitas bunyi yang diterima C dari A dan B sama besar, C terletak

- 10 m dari A dan 2 m dari B
 - 9 m dari A dan 3 m dari B
 - 8 m dari A dan 4 m dari B
 - 7 m dari A dan 5 m dari B
 - 1 m dari A dan 11 m dari B
- Taraf intensitas bunyi sebuah mesin adalah 60 dB (intensitas ambang pendengaran = 10^{12} W/m²). Jika taraf intensitas di dalam ruang pabrik yang menggunakan sejumlah mesin itu adalah 80 dB, jumlah mesin yang digunakannya adalah
 - 200
 - 140
 - 100
 - 20
 - 10
 - Gambar menunjukkan dua sumber bunyi S_1 dan S_2 yang identik. Kedua sumber tersebut bergetar mengeluarkan gelombang yang sefase satu dengan yang lain. Dengan mengubah L_1 , bunyi terlemah didengar ketika $L_1 - L_2$ adalah 20 cm. Jika laju rambat bunyi adalah 340 m/s, besar frekuensi sumber bunyi tersebut adalah
 - 560 Hz
 - 850 Hz
 - 1.700 Hz
 - 3.400 Hz
 - 6.800 Hz



- Pada jarak 3 meter dari sumber ledakan terdengar bunyi dengan taraf intensitas 50 dB. Pada jarak 30 meter dari sumber ledakan, bunyi tersebut terdengar dengan taraf intensitas
 - 5 dB
 - 20 dB
 - 30 dB
 - 35 dB
 - 45 dB
- Seorang penerbang yang pesawat terbangnya menuju ke menara bandara mendengar bunyi sirene menara dengan frekuensi 2.000 Hz. Jika sirene memancarkan bunyi dengan frekuensi 1.700 Hz dan cepat rambat bunyi di udara 310 m/s, kecepatan pesawat udara tersebut adalah
 - 196 km/jam
 - 200 km/jam
 - 216 km/jam
 - 220 km/jam
 - 236 km/jam
- Upik berdiri di samping sumber bunyi yang frekuensinya 676 hertz. Sebuah sumber bunyi lain dengan frekuensi 676 hertz mendekati Upik dengan

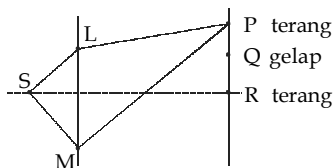
kecepatan 2 m/s. Jika kecepatan merambat bunyi di udara adalah 340 m/s, maka Upik akan mendengar layangan dengan frekuensi

- 0
- 2 hertz
- 4 hertz
- 6 hertz
- 8 hertz

14. Dua gelombang cahaya koheren berinterferensi. Di tempat-tempat terjadinya sinar yang terang, beda sudut fase kedua gelombang tersebut sama dengan ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

- $\frac{1}{2}(2n+1)\pi$
- $(n+1)\pi$
- $(2n+1)\pi$
- $2(n+1)\pi$
- $\frac{1}{2}(n+1)\pi$

15. Hasil percobaan Young dengan sinar monokromatik dilukiskan seperti pada gambar.



Garis terang pada P terjadi jika $PM - PL$ sama dengan

- $\frac{1}{2}\lambda$
- λ
- $\frac{3}{2}\lambda$
- 2λ
- $\frac{5}{2}\lambda$

16. Seberkas cahaya monokromatis dijatuhkan pada dua celah sempit vertikal berdekatan dengan jarak 0,01 mm. Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada jarak 20 cm dari celah. Jika jarak antara garis gelap pertama di sebelah kiri ke garis gelap pertama di sebelah kanan adalah 7,2 mm, panjang gelombang berkas cahaya tersebut adalah

- 180 nm
- 270 nm
- 360 nm
- 720 nm
- 1.800 nm

17. Dua celah yang berjarak 1 mm disinari cahaya merah dengan panjang gelombang $6,5 \times 10^{-7}$ m. Garis gelap-terang dapat diamati pada layar yang berjarak 1 m dari celah. Jarak antara gelap ketiga dari terang kelima adalah

- 0,85 mm
- 1,62 mm
- 2,55 mm
- 3,25 mm
- 4,87 mm

18. Diinginkan untuk mengurangi pantulan dari permukaan kaca ($n = 1,6$) dengan menempelkan lapisan transparan yang tipis terbuat dari MgF_2 ($n = 1,38$) pada permukaan kaca itu. Tebal lapisan itu yang diperlukan agar diperoleh pantulan minimum, apabila cahaya dengan $\lambda = 500$ nm datang secara normal adalah

- 310 Å
- 510 Å
- 910 Å
- 2.500 Å
- 10.500 Å

19. Sebuah celah sempit tunggal dengan lebar a disinari oleh cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 5.890 Å. Agar terjadi pola difraksi maksimum dengan orde pertama pada sudut 30° , lebar celah tersebut adalah

- 5.890 Å
- 11.780 Å
- 17.670 Å
- 23.670 Å
- 29.450 Å

20. Cahaya monoromatik dengan panjang gelombang 660 nm datang tegak lurus mengenai sebuah kisi difraksi dan menghasilkan pola interferensi pada layar di belakangnya. Jarak antarpita tersebut adalah 6 mm. Agar jarak antarpita menjadi 5 mm, diperlukan cahaya monokromatik dengan panjang gelombang

- 925 nm
- 850 nm
- 725 nm
- 550 nm
- 450 nm

21. Untuk mengukur panjang gelombang sinar merah dilakukan percobaan sebagai berikut: sinar kuning ($\lambda = 580$ nm) dijatuhkan tegak lurus pada sebuah kisi. Pola difraksi diterima di layar yang jaraknya 40 cm dari kisi. Garis terang orde pertama berjarak 0,58 mm dari garis terang pusat. Sesudah itu sinar merah dijatuhkan tegak lurus pada kisi. Ternyata, garis terang orde pertama berjarak 0,65 mm dari terang pusat. Panjang gelombang sinar merah tersebut adalah

- 620 nm
- 630 nm
- 640 nm
- 650 nm
- 660 nm

22. Seberkas cahaya jatuh pada permukaan medium dengan indeks bias $\sqrt{3}$. Jika sinar pantulnya terpolarisasi linear, sudut datangnya adalah

- 30°
- 37°
- 45°
- 53°
- 60°

23. Warna biru langit terjadi karena cahaya Matahari mengalami

- difraksi
- hamburan
- interferensi
- pemantulan
- pembiasan



24. Pada percobaan polarisasi cahaya, intensitas cahaya yang dilewatkan oleh analisator berkurang 87,5%. Sudut antara sumbu polarisator dan analisator adalah
- 30°
 - 37°
 - 45°
 - 53°
 - 60°
25. Berkas cahaya dengan intensitas I_0 dilewatkan pada tiga buah polaroid. Sumbu polarisator polaroid pertama dan kedua membentuk sudut 45°. Sumbu

polarisator polaroid kedua dan ketiga juga membentuk sudut 45°. Intensitas berkas cahaya yang dilewatkan oleh ketiga susunan polaroid tersebut adalah

- $\frac{1}{2} i_0$
- $\frac{1}{4} i_0$
- $\frac{1}{8} i_0$
- $\frac{1}{16} i_0$
- 0

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Seutas dawai yang kedua ujungnya terikat dan panjangnya 60 cm, ditegangkan dengan gaya 180 N. Massa jenis linier dawai 0,05 kg/m. Dawai tersebut digetarkan sehingga terbentuklah gelombang stasioner dengan 4 buah simpul.
 - Gambarkanlah pola gelombang pada dawai.
 - Berapakah panjang gelombang dawai?
 - Berapakah cepat rambat gelombang transversal pada dawai?
 - Berapakah frekuensi getaran dawai?
- Pipa organa dengan panjang 180 cm terbuka pada kedua ujungnya. Pipa tersebut beresonansi pada dua frekuensi harmonik berurutan, yaitu 275 Hz dan 330 Hz. Tentukan:
 - frekuensi nada dasar pipa organa,
 - panjang gelombangnya, dan
 - cepat rambat bunyi di udara saat itu.
- Gelombang bunyi dengan taraf intensitas 60 dB mengenai gendang telinga yang luasnya $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.
 - Tentukan intensitas bunyi yang diterima gendang telinga.
 - Berapakah energi bunyi yang diserap gendang telinga tiap sekon?
 - Berapakah lama waktu yang diperlukan untuk menyerap energi sebesar 1 J? Intensitas ambang bunyi 10^{-12} W/m^2 .
- Dua sumber bunyi terpisah pada jarak 2 m. Seorang berdiri pada jarak 3 m dari sumber bunyi pertama dan 3,5 m dari sumber kedua.
 - Berapa frekuensi minimum bunyi sehingga Buyung mendapati hasil interferensi minimum?
 - Tentukan dua nilai frekuensi lain yang juga menghasilkan interferensi minimum di titik tersebut. Cepat rambat bunyi di udara 340 m/s.
- Suatu sumber bunyi bergerak relatif terhadap pendengar yang diam. Jika cepat rambat bunyi di udara 325 m/s dan kecepatan sumber bunyi 25 m/s, tentukan frekuensi yang diterima pendengar itu pada saat sumber bunyi.
 - mendekati pengamat, dan
 - menjauhi pengamat.
- Dua berkas cahaya dengan panjang gelombang 480 nm dan 620 nm melewati tegak lurus dua celah yang terpisah pada jarak 0,54 mm. Pola interferensi ditangkap oleh layar yang berjarak 1,6 m dari celah. Berapa jauh jarak antara garis terang orde ke-2 untuk kedua gelombang tersebut pada layar?
- Pada percobaan celah ganda Young diperoleh bahwa cahaya ungu dengan panjang gelombang 400 nm memberikan maksimum orde ke-2 pada lokasi tertentu dilayar. Berapa panjang gelombang cahaya yang akan memiliki minimum orde ke-2 pada lokasi yang sama?
- Berapakah lebar terang pusat pada difraksi oleh celah tunggal jika panjang gelombang cahaya yang digunakan 600 nm, jarak celah ke layar 2,5 m, dan lebar celahnya 0,025 mm?
- Cahaya putih yang mengandung panjang gelombang dari 400 nm sampai dengan 750 nm jatuh pada kisi difraksi dengan 7.500 garis/cm. Jika layar berada pada jarak 2,3 m di belakang kisi, berapakah lebar spektrum orde pertama?
- Tentukan sudut persilangan sumbu polaroid agar intensitas cahaya yang diteruskan berkurang
 - 25%, dan
 - 12,5%.



Sumber: *Jendela Iptek*, 1997 dan *Physics*, 1980

B a b 3

Elektrostatika

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi dengan cara memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik, serta penerapannya pada keping sejajar.

Dalam kehidupan sehari-hari, banyak kejadian di sekitar Anda yang tampak sederhana, tetapi ternyata mengandung makna yang mendalam. Misalnya, ketika Anda menggosokkan batu ambar (karet atau damar dari pohon yang telah dikeraskan) pada sepotong kain wol atau bulu halus, kemudian diletakkan di dekat benda ringan seperti bulu ayam, bulu ayam tersebut akan terbang dan menempel di batu ambar. Contoh lainnya, ketika Anda menggosokkan sebatang sisir plastik pada rambut kering, kemudian didekatkan pada potongan-potongan kertas kecil, potongan-potongan kertas tersebut akan tertarik dan melekat pada sisir plastik.

Pernahkah Anda bertanya-tanya, mengapa bulu ayam dan potongan-potongan kertas dapat tertarik dan menempel pada batu ambar dan sisir plastik? Apakah peristiwa tersebut berhubungan dengan sihir ataukah dapat dijelaskan secara ilmiah? Anda tentu ingin tahu jawabannya, bukan? Dalam bab ini Anda akan mempelajari sebuah cabang ilmu Fisika yang dapat menjelaskan peristiwa-peristiwa tersebut, yaitu elektrostatika (listrik statis). Jadi, pelajailah bab ini dengan saksama.

- A. Benda Bermuatan Listrik**
- B. Hukum Coulomb**
- C. Medan Listrik**
- B. Potensial Listrik**
- C. Kapasitor**

Soal Pramateri

1. Sebutkan dua jenis muatan listrik yang Anda ketahui.
2. Jika dua benda bermuatan listrik sejenis saling didekatkan, apa yang akan terjadi? Bagaimana jika sebaliknya?
3. Apakah setiap benda selalu bermuatan listrik? Jelaskan.

Di Kelas X, Anda telah mempelajari listrik dinamis atau *elektrodinamika*, yaitu cabang ilmu Fisika yang berkaitan dengan muatan listrik bergerak. Pada bab ini, Anda akan mempelajari besaran-besaran Fisika yang berkaitan dengan muatan listrik yang diam. Cabang ilmu Fisika ini disebut *elektrostatika*.

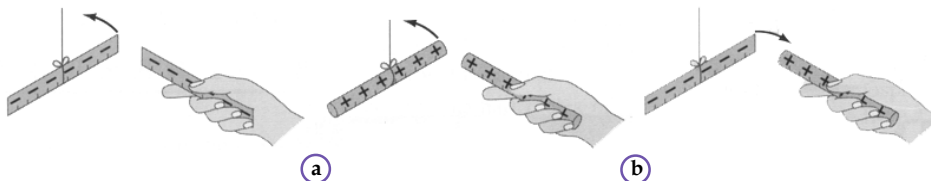
A Benda Bermuatan Listrik

Ketika rambut kering disisir dengan sisir plastik, kemudian sisir tersebut didekatkan pada potongan-potongan kecil kertas, potongan-potongan kertas tersebut akan tertarik oleh sisir plastik. Gejala yang sama terjadi ketika batang plastik dan batang kaca digosok menggunakan kain. Gejala seperti ini disebut elektrostatika. Gesekan antara sisir plastik dan rambut kering serta penggosokan batang plastik dan batang kaca oleh kain menyebabkan sisir plastik, batang plastik, dan batang kaca menjadi bermuatan listrik.

Apabila dua batang plastik yang telah digosok oleh kain didekatkan satu sama lain, kedua batang plastik ini tolak-menolak. Demikian pula ketika dua batang kaca yang telah digosok kain sutra didekatkan, keduanya juga tolak-menolak. Akan tetapi, ketika mistar plastik dan batang kaca tersebut didekatkan, keduanya saling menarik. Hasil ini menunjukkan bahwa ada dua jenis muatan listrik. Muatan listrik sejenis tolak-menolak dan muatan listrik tak sejenis tarik-menarik. Muatan listrik pada batang plastik, oleh **Benjamin Franklin** (1700–1790), diberi nama muatan listrik positif, sedangkan muatan listrik pada batang kaca diberi nama muatan listrik negatif.

Gambar 3.1

Interaksi (a) antarmuatan sejenis akan tolak-menolak dan (b) muatan tak sejenis akan tarik-menarik.

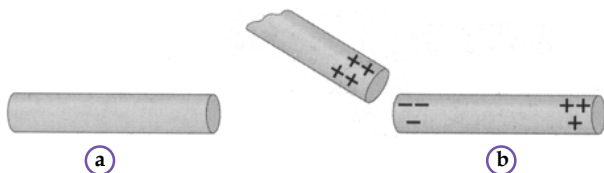


Saat ini diketahui bahwa gejala kelistrikan berawal dari atom. Atom terdiri atas proton yang bermuatan positif, neutron yang tidak bermuatan, dan elektron yang bermuatan negatif. Besar muatan listrik proton dan elektron sama tetapi berlawanan jenis. Dengan demikian, atom netral mengandung jumlah proton dan elektron yang sama. Akan tetapi, kadang-kadang atom kehilangan atau kelebihan elektron. Ketika atom kehilangan elektronnya, atom akan bermuatan positif. Sebaliknya, ketika atom kelebihan elektron, atom akan bermuatan negatif.

Apa sebenarnya yang terjadi ketika batang plastik dan batang kaca digosok oleh kain? Dalam tinjauan mikroskopik, ketika batang plastik digosok dengan kain, elektron pindah dari kain ke batang plastik sehingga batang plastik menjadi bermuatan negatif, sedangkan kain menjadi bermuatan positif. Sebaliknya, ketika batang kaca digosok kain sutra, elektron dari batang kaca pindah ke kain sutra sehingga batang kaca menjadi bermuatan positif dan kain menjadi bermuatan negatif. Pada kedua kasus tersebut, jumlah muatan pada batang, kaca, dan kain, sebelum dan sesudah penggosokan berlangsung adalah tetap atau kekal.

Selain dengan cara penggosokan, membuat benda menjadi bermuatan listrik dapat pula dilakukan melalui induksi. Misalnya, ketika sebuah batang logam netral didekatkan dengan batang logam bermuatan listrik positif, elektron-elektron pada batang logam netral akan bergerak menuju ke ujung batang logam yang berdekatan dengan batang logam bermuatan positif. Akibatnya,

terjadi pemisahan muatan listrik pada batang logam netral, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.2**. Jika batang logam netral tersebut dipotong menjadi dua, salah satu batang logam akan bermuatan listrik positif dan batang lainnya bermuatan listrik negatif.



Gambar 3.2

- (a) Sebuah batang logam netral.
(b) Menjadikan batang bermuatan listrik dengan cara induksi.

Mahir Meneliti 3.1

Mengamati Gejala Elektrostatika

Alat dan Bahan

1. Sebuah balon
2. Seutas benang
3. Potongan-potongan kertas atau kacang
4. Air keran
5. Dinding beton, logam, kaca, dan plastik
6. Kain wol

Prosedur

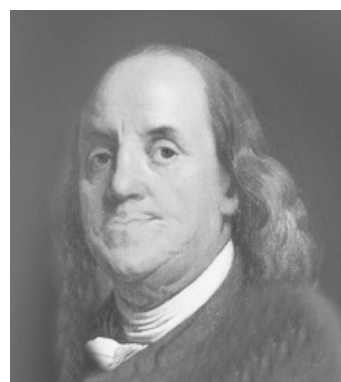
1. Tiuplah sebuah balon, kemudian ikat bagian ujungnya dengan benang.
2. Berilah tanda titik A pada suatu permukaan balon dan tanda titik B pada permukaan yang lain (berlawanan dengan titik A).
3. Gosoklah titik A dengan kain wol, kemudian dekatkan pada potongan-potongan kertas atau kacang-kacangan, seperti pada (**Gambar (a)**). Apakah yang terjadi?
4. Dekatkan pula bagian balon yang diberi tanda titik B (bagian yang tidak digosok kain wol) pada potongan-potongan kertas. Apakah yang terjadi?
5. Gosoklah kembali tanda titik A, kemudian tempelkan bagian tersebut pada dinding yang berbeda, diantaranya dinding beton, logam, kaca, dan plastik (**Gambar (b)**). Apakah yang terjadi?
6. Dekatkanlah tanda titik A dan B pada aliran air dari keran (**Gambar (c)**). Apakah yang terjadi?
7. Diskusikan hasil percobaan yang telah dilakukan, kemudian buatlah kesimpulan dari hasil kegiatan tersebut.



Sumber: www.phys.virginia.edu

Jelajah Fisika

Benjamin Franklin (1700–1790)



Benjamin Franklin percaya bahwa ada dua jenis muatan listrik. Dia mengungkapkan bahwa muatan listrik tersebut seperti "cairan" yang menyebar dengan sendirinya ke seluruh benda. Muatan tersebut bisa melompat ke benda lain dan menimbulkan bunga api. Percobaannya terhadap petir dilakukan dengan cara menerbangkan layang-layang pada saat badai guntur untuk "mengumpulkan" listrik dari petir.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Contoh 3.1

Ada empat buah muatan listrik A, B, C, dan D. Muatan A menarik B, B menolak C, dan C menarik D. Jika D bermuatan positif, tentukan jenis muatan listrik lainnya.

Jawab

Dua muatan listrik tarik-menarik jika tak sejenis dan tolak-menolak jika sejenis. Oleh karena D bermuatan positif, sedangkan C menarik D, maka C bermuatan *negatif*. Selanjutnya, B menolak C maka B bermuatan sejenis dengan C, yakni *negatif*. Terakhir, karena A menarik B, sedangkan B negatif, maka A bermuatan *positif*.

Soal Penguasaan Materi 3.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Jika sebuah logam dijadikan bermuatan listrik dengan cara digosok, bagaimanakah cara mengetahui bahwa jenis muatan tersebut positif atau negatif?
2. Diketahui muatan elektron, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C. Tentukan besar muatan sebuah partikel jika:
 - a. kelebihan 2×10^{12} elektron, dan
 - b. kekurangan 10^{13} elektron.
3. Mengapa mistar plastik yang telah digosok-gosokkan ke kulit tubuh dapat menarik potongan-potongan kecil kertas? Tuliskan alasannya.
4. Apa yang terjadi jika sebuah logam netral disentuh oleh logam lain yang bermuatan listrik:
 - a. positif, dan
 - b. negatif?

B Hukum Coulomb

Telah Anda ketahui bahwa dua buah benda bermuatan listrik sejenis tolak-menolak dan muatan listrik tak sejenis tarik-menarik. Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi besar kecilnya gaya tarik atau gaya tolak antarmuatan listrik tersebut? Pertanyaan ini dijawab oleh **Charles de Coulomb** (1736–1806) pada 1780-an. Hasil eksperimen Coulomb menunjukkan bahwa *gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua muatan listrik berbanding lurus dengan besar setiap muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut*. Pernyataan ini dikenal sebagai Hukum Coulomb dan secara matematis dinyatakan dengan persamaan,

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (3-1)$$

dengan: F = gaya Coulomb (N),
 Q = muatan listrik (*coulomb*, disingkat C),
 r = jarak antara kedua muatan (m), dan
 k = konstanta kesebandingan (Nm^2/C^2).

Konstanta k pada **Persamaan (3-1)** berkaitan dengan permitivitas listrik ruang hampa (ϵ_0), dan memenuhi hubungan

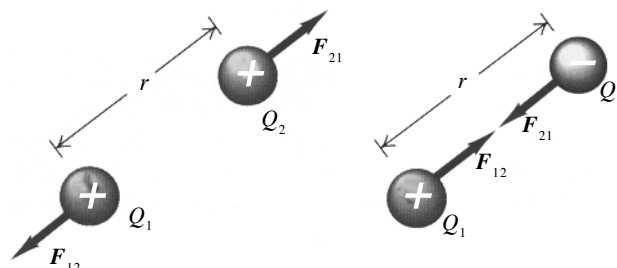
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3-2)$$

Jika nilai $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ dimasukkan ke **Persamaan (3-2)**, diperoleh $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Persamaan (3-1) menyatakan besar gaya Coulomb antarmuatan listrik. Arah gaya Coulomb pada tiap muatan selalu berada pada garisambung antara kedua muatan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.3**. Jika kedua muatannya sejenis, gaya pada muatan pertama menjauhi muatan kedua. Sebaliknya, jika muatannya tidak sejenis, arah gaya pada muatan pertama menuju ke muatan kedua. Perhatikan bahwa gaya pada setiap muatan merupakan pasangan gaya aksi-reaksi, besarnya sama dan arahnya berlawanan.

Gambar 3.3

Arah gaya pada:
(a) muatan sejenis, dan
(b) muatan tak sejenis.
 F_{12} = gaya pada muatan Q_1 oleh muatan Q_2 dan
 F_{21} = gaya pada muatan Q_2 oleh muatan Q_1 .



Ketika menghitung gaya antarmuatan menggunakan Hukum Coulomb, abaikan tanda muatan (diambil nilai positifnya saja) dan arahnya ditentukan seperti pada **Gambar 3.3**. Jika terdapat beberapa muatan listrik statis, gaya yang dialami oleh sebuah muatan merupakan resultan dari gaya-gaya yang disebabkan oleh tarik-menarik atau tolak-menolak antara muatan tersebut dengan muatan lainnya. Oleh karena gaya memiliki besar dan arah (besaran vektor), menjumlahkan gaya-gaya tersebut harus sesuai dengan aturan vektor, seperti yang telah dipelajari di Kelas X.

Contoh 3.2

Dua buah muatan listrik masing-masing $20 \mu\text{C}$ dan $-20 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 30 cm.

- Tentukan besar dan arah gaya pada muatan pada setiap muatan.
- Jika jaraknya dijadikan 60 cm, berapa besar gaya antarmuatan tersebut sekarang?

Jawab

Diketahui: $Q_1 = 20 \mu\text{C} = 20 \times 10^{-6} \text{C}$, $Q_2 = 20 \mu\text{C} = 20 \times 10^{-6} \text{C}$, dan $r = 30 \text{cm} = 0,3 \text{m}$.

- Besar gaya pada setiap muatan (gunakan **Persamaan (3-1)**), ambil harga positifnya.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(20 \times 10^{-6} \text{C})(20 \times 10^{-6} \text{C})}{(0,3 \text{m})^2} = 40 \text{N}.$$

Oleh karena kedua muatan tak sejenis, gayanya tarik-menarik. Arah gaya pada muatan Q_1 menuju Q_2 , sedangkan arah gaya pada muatan Q_2 menuju Q_1 .

- Jarak 60 cm sama dengan 2 kali jarak semula (30 cm). Dari **Persamaan (3-1)**, untuk muatan tetap, gaya antarmuatan berbanding terbalik dengan kuadrat

jarak, $\left(F \propto \frac{1}{r^2}\right)$. Dengan kata lain, jika $r = 2$ kali semula atau $r^2 = 4$ kali semula,

$F = \frac{1}{4}$ kali semula. Jadi, ketika jaraknya dijadikan 60 cm, gaya antarmuatan menjadi

$$F = \frac{1}{4} \times 40 \text{N} = 10 \text{N}.$$

Jelajah Fisika

Charles de Coulomb
(1789–1900)

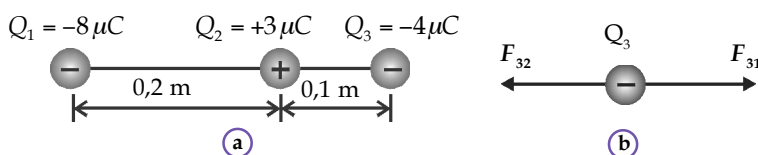


Pada 1780-an, fisikawan Prancis, Charles de Coulomb adalah salah satu ilmuwan pertama yang meneliti mengenai cara muatan listrik bereaksi.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Contoh 3.3

Tiga buah partikel bermuatan listrik terdapat pada satu garis lurus, seperti tampak pada gambar berikut. Hitunglah gaya Coulomb pada muatan $Q_3 = 4 \mu\text{C}$ akibat dua muatan lainnya.



Jawab

Diketahui: $Q_1 = 8 \mu\text{C} = 8 \times 10^{-6} \text{C}$, $Q_2 = 3 \mu\text{C} = 3 \times 10^{-6} \text{C}$,
 $Q_3 = 4 \mu\text{C} = 4 \times 10^{-6} \text{C}$, $r_{13} = 0,3 \text{m}$, dan $r_{23} = 0,1 \text{m}$.

Muatan Q_3 mendapatkan dua gaya, gaya tolak oleh Q_1 , sebut F_{31} , dan gaya tarik oleh Q_2 , sebut F_{32} , seperti diperlihatkan pada **Gambar (b)**. Besar setiap gaya tersebut adalah

$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r_{32}^2} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{C})(8 \times 10^{-6} \text{C})}{(0,3 \text{m})^2} = 3,2 \text{N}$$

Kata Kunci

- Elektron
- Elektrostatika
- Gaya Coulomb
- Hukum Coulomb
- Konstanta kesebandingan
- Muatan listrik
- Permittivitas listrik ruang hampa

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(3 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,1 \text{ m})^2} = 10,8 \text{ N}.$$

Oleh karena F_{31} berlawanan arah dengan F_{32} , resultannya adalah $F = F_{31} - F_{32} = 3,2 \text{ N} - 10,8 \text{ N} = -7,6 \text{ N}$.

Dengan kata lain, besar gaya pada muatan Q_3 adalah 7,6 N dan berarah ke kiri (tanda *negatif*).

Contoh 3.4

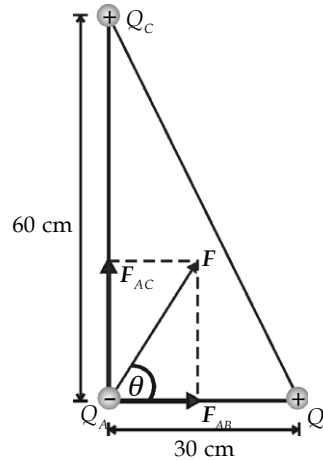
Sebuah segitiga ABC siku-siku di A. Panjang sisi AB = 30 cm dan panjang sisi AC = 60 cm. Tiga buah muatan titik masing-masing $20 \mu\text{C}$, $30 \mu\text{C}$, dan $160 \mu\text{C}$ ditempatkan berturut-turut di titik A, B, dan C. Tentukan gaya yang dialami muatan listrik di titik A.

Jawab

Diketahui: $Q_A = 20 \mu\text{C} = 20 \times 10^{-6} \text{ C}$, $Q_B = 30 \mu\text{C} = 3 \times 10^{-5} \text{ C}$, $Q_C = 160 \mu\text{C} = 16 \times 10^{-4} \text{ C}$,
 $r_{AB} = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$, dan $r_{AC} = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$.

Muatan di titik A ditarik oleh muatan di titik B (F_{AB}) dan ditarik oleh muatan di titik C (F_{AC}) dengan arah masing-masing seperti ditunjukkan pada gambar berikut.

Besar kedua setiap gaya tersebut adalah



$$F_{AB} = k \frac{Q_A Q_B}{r_{AB}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-5} \text{ C})(3 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,3 \text{ m})^2} = 60 \text{ N},$$

$$F_{AC} = k \frac{Q_A Q_C}{r_{AC}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-5} \text{ C})(1,6 \times 10^{-4} \text{ C})}{(0,6 \text{ m})^2} = 80 \text{ N}.$$

Oleh karena kedua gaya saling tegak lurus, resultan gaya pada muatan di titik A adalah

$$F = \sqrt{F_{AB}^2 + F_{AC}^2} = \sqrt{(60 \text{ N})^2 + (80 \text{ N})^2} = 100 \text{ N}$$

$$\text{dan arahnya } \theta = \arctan\left(\frac{F_{AC}}{F_{AB}}\right) = \arctan\left(\frac{80 \text{ N}}{60 \text{ N}}\right) = \arctan\left(\frac{4}{3}\right) = 53^\circ \text{ terhadap } F_{AB}.$$

Contoh 3.5

Sebuah benda bermassa 200 gram dan bermuatan $Q_1 = 5 \mu\text{C}$ digantungkan pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat di sebelah kanan benda pada jarak 15 cm diletakkan muatan $Q_2 = -1 \mu\text{C}$ yang menyebabkan posisi benda menjadi seperti pada **Gambar (a)**. Tentukan besar gaya tegangan tali serta sudut antara gaya tegangan tali dan garis vertikal.

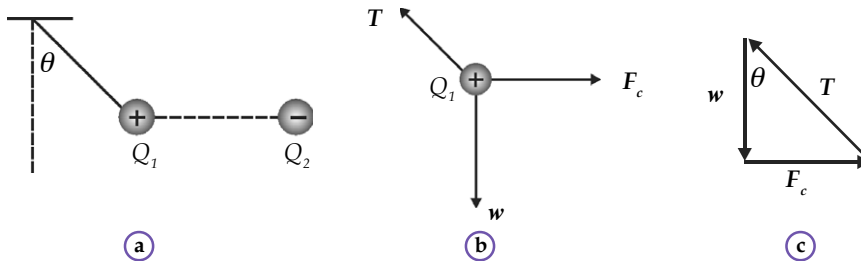
Jawab

Diketahui: $m = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$, $Q_1 = 5 \mu\text{C} = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$, $Q_2 = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$, dan $r = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$.

Gaya-gaya yang bekerja pada muatan Q_1 ditunjukkan pada **Gambar (b)**. F_c adalah gaya Coulomb pada muatan Q_1 oleh Q_2 , w adalah gaya berat muatan Q_1 , dan T adalah gaya tegangan tali yang juga bekerja pada Q_1 . Besar gaya Coulomb dan gaya berat setiap benda adalah

$$F_c = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-6} \text{ C})(10^{-6} \text{ C})}{(0,15 \text{ m})^2} = 2 \text{ N}.$$

$$\text{dan } w = mg = (0,2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 2 \text{ N}.$$



Sistem dalam keadaan setimbang maka resultan gaya yang bekerja pada muatan Q_1 sama dengan nol. Secara grafis ketiga gaya tersebut membentuk sebuah segitiga siku-siku seperti tampak pada **Gambar (c)**. Secara geometri, diperoleh tanda kurung biasa (gunakan dalil Pythagoras),

$$F_r = \sqrt{F_c^2 + w^2} = \sqrt{(2 \text{ N})^2 + (2 \text{ N})^2} = 2\sqrt{2} = 2,8 \text{ N}$$

dan sudutnya terhadap garis vertikal

$$\theta = \arctan\left(\frac{F}{w}\right) = \arctan\left(\frac{2 \text{ N}}{2 \text{ N}}\right) = \arctan(1) = 45^\circ.$$

Soal Penguasaan Materi 3.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Dua buah muatan listrik, Q_1 dan Q_2 , terpisah pada jarak r . Gaya interaksi antarmuatan tersebut adalah F . Tentukan besar gaya interaksinya jika:
 - jaraknya dijadikan setengah kali semula, sedangkan muatannya tetap, dan
 - besar kedua muatan menjadi dua kali, sedangkan jaraknya tetap.
- Dua buah muatan listrik, $Q_1 = 2 \mu\text{C}$ dan $Q_2 = 4 \mu\text{C}$, terpisah pada jarak 10 cm.
 - Tentukan gaya Coulomb antarmuatan tersebut.
 - Jika jaraknya dijadikan 20 cm, berapakah besar gaya Coulomb sekarang?
 - Jika sebuah muatan q akan diletakkan di sekitar kedua muatan, di manakah muatan q harus diletakkan agar muatan tersebut tidak mendapat gaya?
- Elektron atom hidrogen bergerak mengelilingi inti atom pada orbit lingkaran dengan jari-jari $0,53 \text{ \AA}$. Muatan inti atom $+1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ dan muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.
 - Tentukan gaya elektrostatik (Coulomb) antara elektron dan inti atom tersebut.
 - Tentukan kecepatan elektron. Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- Pada titik-titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan panjang sisi 30 cm terdapat muatan listrik statis masing-masing $2 \mu\text{C}$, $3 \mu\text{C}$, dan $2 \mu\text{C}$. Tentukan gaya Coulomb yang dialami setiap muatan.

Kata Kunci

- Medan listrik
- Muatan titik

C Medan Listrik

Medan listrik adalah ruang atau daerah yang masih dipengaruhi gaya listrik. Medan listrik selalu ada di sekitar muatan listrik. Besaran yang digunakan untuk menyatakan medan listrik disebut kuat medan listrik.

1. Medan Listrik oleh Benda Titik Bermuatan

Ada tidaknya medan listrik di suatu daerah diuji dengan cara menyimpan sebuah muatan uji positif di daerah tersebut. Jika muatan uji tersebut mendapat gaya, berarti ada medan listrik di daerah tersebut. Sebaliknya, jika muatan uji tidak mendapat gaya, berarti tidak ada medan listrik di daerah tersebut. Ketika muatan uji mendapat gaya, kuat medan listrik di daerah tersebut didefinisikan sebagai gaya yang dialami muatan uji dibagi oleh besar muatan uji. Secara matematis ditulis,

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (3-3)$$

dengan: E = kuat medan listrik (N/C),

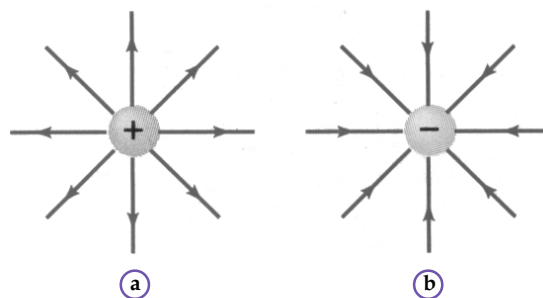
F = gaya yang dialami muatan uji (N), dan

q_0 = besar muatan uji (C).

Persamaan (3-3) menunjukkan bahwa arah medan listrik selalu sama dengan arah gaya pada muatan uji. Untuk memahami arah medan listrik, tinjaulah **Gambar 3.4**. Ketika muatan uji positif disimpan pada jarak r dari muatan sumber positif (lihat **Gambar 3.4(a)**), muatan uji tersebut akan mendapat gaya tolak dari muatan sumber. Oleh karena arah gaya pada muatan uji menjauhi muatan sumber, arah medan listriknya pun menjauhi muatan sumber. Akan tetapi, ketika muatan sumbernya negatif (lihat **Gambar 3.4(b)**), arah gaya pada muatan uji menuju muatan sumber (tarik-menarik) sehingga arah medan listriknya pun menuju muatan sumber negatif. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa arah medan listrik di sekitar muatan sumber positif selalu menjauhi muatan sumbernya dan sebaliknya, arah medan listrik di sekitar muatan sumber negatif selalu menuju ke muatan tersebut.

Gambar 3.4

Arah medan listrik:
(a) di sekitar muatan positif, dan
(b) di sekitar muatan negatif.



Sesuai dengan **Persamaan (3-1)**, gaya yang dialami muatan uji positif q_0 dari sebuah muatan sumber Q , yang terpisah pada jarak r dapat ditulis

$$F = k \frac{Qq_0}{r^2} \mathbf{r}$$

Jika persamaan tersebut disubstitusikan ke **Persamaan (3-3)**, besar kuat medan listrik yang dihasilkan oleh sumber muatan titik dinyatakan dengan persamaan

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{Q}{r^2} \mathbf{r}$$

(3-4)

Persamaan (3-4) menunjukkan bahwa kuat medan listrik pada suatu titik di sekitar sebuah muatan listrik sebanding dengan besar muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik ke muatan tersebut. Dengan kata lain, jika muatannya dijadikan 2 kali semula, pada jarak yang tetap, kuat medan listriknya menjadi 2 kali semula. Akan tetapi, jika jaraknya dijadikan 2 kali semula, muatan sumbernya tetap, kuat medan listriknya akan menjadi $\frac{1}{4}$ kali semula, karena kuat medan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.

Kuat medan listrik di suatu titik akibat beberapa sumber muatan titik ditentukan dengan cara menjumlahkan secara vektor semua kuat medan listrik yang ditimbulkan oleh setiap muatan, seperti yang telah dilakukan untuk menghitung gaya Coulomb pada sebuah muatan oleh beberapa muatan lain.

Contoh 3.6

Titik P berjarak 30 cm dari sebuah muatan titik yang besarnya $Q = 25 \mu\text{C}$.

- Hitung besar dan arah medan listrik di titik P.
- Berapa percepatan awal muatan $q = 2 \mu\text{C}$ yang dilepaskan dari titik P, jika massanya 2 g?

Jawab

Diketahui: $r = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$, $Q = 25 \mu\text{C} = 2,5 \times 10^{-5} \text{ C}$, $q = 2 \mu\text{C} = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$, dan $m = 2 \text{ g} = 2 \times 10^{-3} \text{ kg}$.

- Besar kuat medan listrik di titik P adalah

$$E = k \frac{Q}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(2,5 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,3 \text{ m})^2} = 2,5 \times 10^6 \text{ N/C}.$$

dan arahnya menjauhi muatan Q .

- Berdasarkan Hukum Kedua Newton, $a = \frac{F}{m}$. Gaya yang dialami muatan q di

titik P berdasarkan **Persamaan (3-3)** adalah

$$F = qE = (2 \times 10^{-6} \text{ C})(2,5 \times 10^6 \text{ N/C}) = 5 \text{ N}$$

sehingga percepatan awalnya

$$a = \frac{F}{m} = \frac{5 \text{ N}}{(2 \times 10^{-3} \text{ kg})} = 2,5 \times 10^3 \text{ m/s}^2.$$

Contoh 3.7

Dua buah muatan listrik masing-masing $Q_1 = 20 \mu\text{C}$ dan $Q_2 = -45 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 50 cm satu sama lain. Tentukan besar dan arah medan listrik di titik P jika:

- titik P tersebut berada pada garis hubung kedua muatan sejauh 20 cm dari Q_1 (atau 30 cm dari Q_2), dan
- titik P berada pada jarak 40 cm dari Q_1 dan 30 cm dari Q_2 .

Jawab

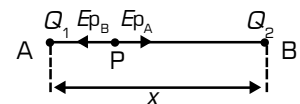
Medan listrik di sekitar dua buah muatan listrik merupakan resultan dari medan listrik yang ditimbulkan oleh setiap muatan tersebut. Oleh karena itu, Anda terlebih dahulu harus menggambarkan arah medan di titik P yang disebabkan oleh setiap muatan.

Solusi Cerdas

Dua partikel masing-masing bermuatan Q_1 dan Q_2 yang besar dan jenisnya tidak diketahui, terpisah dari x . Di antara kedua muatan tersebut dan pada garis hubungnya terdapat titik P pada jarak $\frac{1}{3}x$ dari Q_1 . Jika medan listrik di titik P = 0 maka

- Q_1 dan Q_2 adalah muatan-muatan yang tidak sejenis
- potensial di titik P yang disebabkan oleh Q_1 dan Q_2 sama
- besar muatan $Q_1 = 3$ kali besar muatan Q_2 dan sejenis
- besar muatan $Q_1 = 4$ kali besar muatan Q_2 dan sejenis
- besar muatan $Q_1 = \frac{1}{4}$ kali besar muatan Q_2 dan sejenis

Penyelesaian



Diketahui: $E_P = 0$

$$E_P = E_{PA} - E_{PB}$$

$$0 = E_{PA} - E_{PB}$$

$$E_{PA} = E_{PB}$$

$$k \frac{Q_1}{\left(\frac{1}{3}x\right)^2} = k \frac{Q_2}{\left(\frac{2}{3}x\right)^2}$$

$$Q_1 : Q_2 = \left(\frac{1}{9}x^2\right) : \left(\frac{4}{9}x^2\right)$$

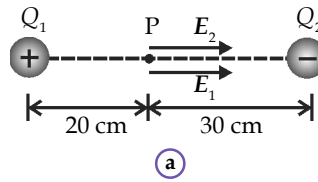
$$Q_1 : Q_2 = 1 : 4$$

$$4Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = \left(\frac{1}{4}\right) Q_2 \text{ (sejenis)}$$

Jawab: e

UN 2004/2005



- a. Kuat medan listrik di titik P oleh masing-masing muatan ditunjukkan pada gambar (a). Arah kuat medan listrik oleh muatan $Q_1 = 20 \text{ C}$ di titik P, sebut E_1 , menjauhi ke muatan Q_1 (karena Q_1 positif) atau menuju Q_2 dan arah kuat medan listrik di titik P oleh muatan $Q_2 = -45 \mu \text{ C}$, sebut E_2 , adalah menuju muatan Q_2 (karena Q_2 negatif). Besar masing-masing kuat medan listrik tersebut adalah

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_{P1}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-5} \text{ C})}{(2 \times 10^{-1} \text{ m})^2} = 4,5 \times 10^6 \text{ N/C}, \text{ dan}$$

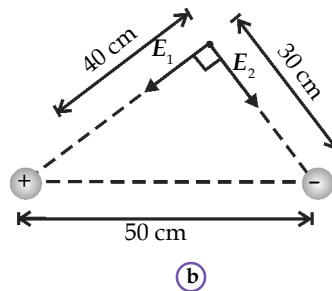
$$E_2 = k \frac{Q_2}{r_{P2}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(4,5 \times 10^{-5} \text{ C})}{(3 \times 10^{-1} \text{ m})^2} = 4,5 \times 10^6 \text{ N/C}.$$

Oleh karena E_1 dan E_2 searah, resultannya adalah

$$E_P = E_1 + E_2 = (4,5 \times 10^6 \text{ N/C}) + (4,5 \times 10^6 \text{ N/C}) = 9 \times 10^6 \text{ N/C}.$$

Jadi, kuat medan listrik di titik P adalah $6,5 \times 10^6 \text{ N/C}$ menuju muatan Q_2 .

- b. Kuat medan listrik di titik P oleh setiap muatan ditunjukkan pada gambar (b). Besar kuat medan listrik oleh setiap muatan adalah



$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_{P1}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-5} \text{ C})}{(4 \times 10^{-1} \text{ m})^2} = 1,125 \times 10^6 \text{ N/C}, \text{ dan}$$

$$E_2 = k \frac{Q_2}{r_{P2}^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(4,5 \times 10^{-5} \text{ C})}{(3 \times 10^{-1} \text{ m})^2} = 4,5 \times 10^6 \text{ N/C}.$$

Oleh karena E_1 dan E_2 saling tegak lurus, besar resultannya adalah

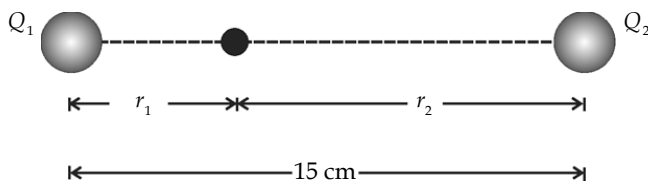
$$E_P = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{(1,125 \times 10^6 \text{ N/C})^2 + (4,5 \times 10^6 \text{ N/C})^2} = 4,64 \times 10^6 \text{ N/C}.$$

Contoh 3.8

Dua buah muatan masing-masing $Q_1 = 4 \mu \text{ C}$ dan $Q_2 = 9 \mu \text{ C}$ terpisah pada jarak 15 cm. Titik P terletak sedemikian sehingga kuat medannya sama dengan nol. Tentukan posisi titik P dari muatan Q_1 .

Jawab

Kuat medan di titik P adalah resultan dua kuat medan listrik (vektor) yang ditimbulkan oleh muatan Q_1 dan Q_2 . Resultan dua buah vektor sama dengan nol jika besar kedua vektor tersebut sama, tetapi berlawanan arah. Syarat tersebut dipenuhi jika titik P berada pada garis hubung antara Q_1 dan Q_2 .



Persamaan (3-4) menunjukkan bahwa agar kuat medan listrik (E) sama, maka $\frac{Q}{r^2}$

harus sama. Dengan kata lain, $\frac{Q_1}{r_1^2} = \frac{Q_2}{r_2^2}$ atau $\frac{\sqrt{Q_1}}{r_1} = \frac{\sqrt{Q_2}}{r_2}$

sehingga diperoleh

$$r_1 : r_2 = \sqrt{Q_1} : \sqrt{Q_2} = \sqrt{4\mu C} : \sqrt{9\mu C} = 2 : 3.$$

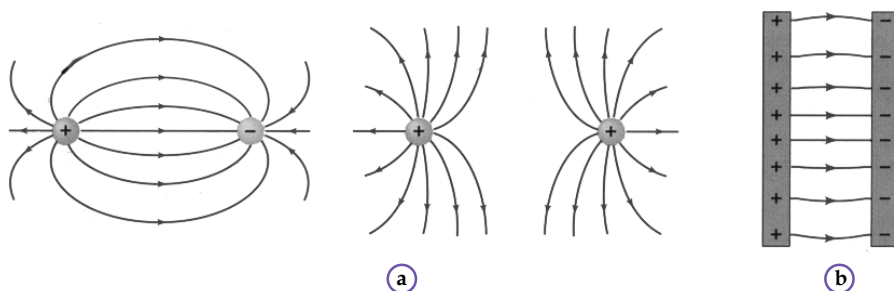
Dengan demikian, posisi titik P dari muatan Q_1 adalah pada jarak

$$r_1 = \frac{2}{2+3} \times 15 \text{ cm} = 6 \text{ cm ke arah } Q_2.$$

2. Fluks Listrik dan Hukum Gauss

Sejauh ini Anda telah menggunakan Hukum Coulomb untuk menghitung medan listrik di suatu titik di sekitar muatan sumber. Metoda lain yang dapat digunakan untuk menghitung medan listrik adalah dengan menggunakan Hukum Gauss. Untuk memahami Hukum Gauss, terlebih dahulu Anda harus memahami pengertian garis-garis gaya medan listrik dan fluks listrik.

Medan listrik dapat digambarkan oleh garis-garis gaya medan listrik. Arah garis-garis gaya medan listrik di sekitar muatan selalu keluar dari muatan listrik positif dan menuju ke muatan listrik negatif. **Gambar 3.5** memperlihatkan garis-garis gaya medan listrik di sekitar muatan listrik positif dan negatif.



Gambar 3.5

Garis-garis gaya medan listrik:
(a) di sekitar dua muatan titik, dan
(b) di antara dua keping sejajar bermuatan.

Untuk memahami fluks listrik, perhatikan **Gambar 3.6 (a)**. Misalnya, ada garis-garis gaya medan listrik seragam dengan kerapatan E menembus bidang seluas A dengan membentuk sudut θ terhadap bidang normal, yaitu vektor yang keluar tegak lurus bidang. Banyaknya garis-garis gaya medan listrik yang menembus tegak lurus luas bidang tertentu disebut *fluks listrik*. Secara matematis, fluks listrik dituliskan

$$\Phi = E_{\perp} A \quad (3-5)$$

dengan: Φ = fluks listrik (*weber*, disingkat Wb),

A = luas bidang (m^2), dan

$E_{\perp}$ = rapat garis gaya medan listrik yang berimpit garis normal atau tegak lurus bidang (Wb/m^2).



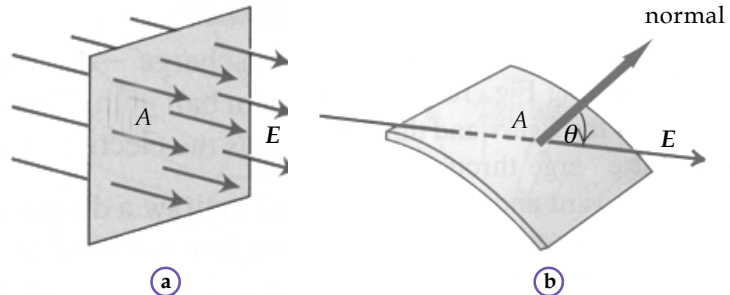
Pada **Gambar 3.6 (b)**, $E_{\perp}$ adalah komponen vektor E pada garis normal sehingga $E_{\perp} = E \cos \theta$. Dengan demikian, **Persamaan (3-5)** dapat ditulis

$$\Phi = E A \cos \theta \quad (3-6)$$

dengan θ = sudut antara E dan normal bidang.

Gambar 3.6

- (a) Garis-garis gaya medan magnet $\mathbf{E}$ menembus tegak lurus bidang, dan
(b) membentuk sudut θ terhadap garis normal.



Gauss menemukan bahwa jumlah garis-garis gaya medan listrik yang menembus suatu permukaan tertutup sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tertutup tersebut. Pernyataan ini kemudian dikenal sebagai Hukum Gauss. Secara matematis, Hukum Gauss dinyatakan oleh

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3-7)$$

dengan q = muatan listrik yang dilingkupi permukaan tertutup (disebut juga permukaan Gauss).

Seperti telah disinggung di awal subbab ini, medan listrik yang dihasilkan sebuah muatan dapat dihitung menggunakan Hukum Gauss. Sekarang, perhatikan **Gambar 3.7**. Garis gaya medan listrik keluar dari medan listrik secara radial (menyebar ke segala arah dalam ruang). Permukaan Gauss dipilih berupa permukaan bola dengan pusat berimpit dengan muatan titik. Perhatikan bahwa garis-garis gaya medan listrik menembus tegak lurus permukaan Gauss sehingga fluks listriknya adalah

$$\Phi = EA \text{ atau } \Phi = E(4\pi r^2)$$

Oleh karena permukaan Gauss berbentuk bola, masukkan fluks listrik ini ke **Persamaan (3-7)** maka

$$E(4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

sehingga diperoleh

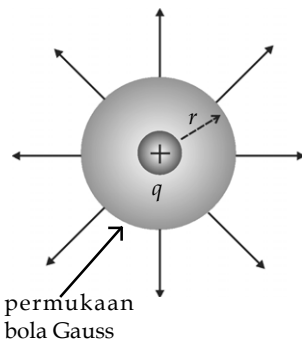
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (3-8)$$

yang sama persis dengan kuat medan listrik di sekitar muatan titik yang diturunkan menggunakan Hukum Coulomb.

Contoh 3.9

Garis-garis gaya medan magnetik seragam dengan kerapatan 150 Wb/m^2 menembus bidang seluas 100 cm^2 . Tentukan fluks listriknya jika garis-garis gayanya menembus:

- tegak lurus bidang, dan
- membentuk sudut 60° dengan normal bidang.



Gambar 3.7

Menentukan medan listrik oleh muatan titik dengan hukum Gauss.

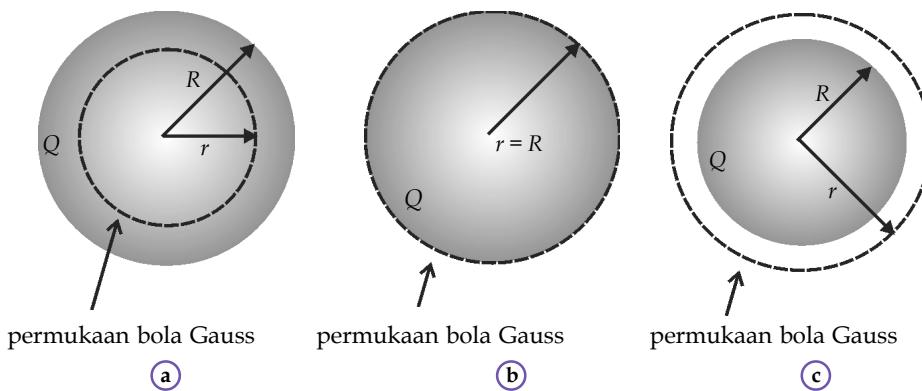
Jawab

Diketahui: $E = 150 \text{ Wb/m}^2$ dan $A = 100 \text{ cm}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$.

- Medan listrik tegak lurus bidang maka
 $\Phi = EA = (150 \text{ Wb/m}^2)(10^{-2} \text{ m}^2) = 1,5 \text{ Wb}$.
- Medan listrik membentuk sudut $\theta = 60^\circ$ dengan garis normal maka
 $\Phi = EA \cos \theta = (150 \text{ Wb/m}^2)(10^{-2} \text{ m}^2)(0,5) = 0,75 \text{ Wb}$.

3. Medan Listrik oleh Bola Konduktor Bermuatan

Pada bola konduktor bermuatan, muatan listrik akan terdistribusi merata pada permukaan bola. Hal ini terjadi karena antarmuatan listrik sejenis tolak-menolak sehingga muatan-muatan pada bola akan berusaha saling menjauh dan berhenti di permukaannya.



Gambar 3.8

Menentukan medan listrik pada bola konduktor bermuatan:
(a) di dalam bola ($r < R$),
(b) di permukaan bola ($r = R$), dan
(c) di luar bola ($r > R$).

Sekarang, tinjau bola konduktor dengan jari-jari R dan muatan total Q seperti diperlihatkan pada **Gambar 3.8**. Medan listrik yang dihasilkan oleh bola konduktor bermuatan dapat ditentukan dengan menerapkan Hukum Gauss. Untuk itu, dibuatlah permukaan Gauss di dalam bola konduktor, di permukaan bola konduktor, dan di luar permukaan bola konduktor. Berikut ini medan listrik di titik pada setiap permukaan Gauss.

a. Di Dalam Bola Konduktor

Oleh karena tidak ada muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan bola Gauss atau $q = 0$, sesuai **Persamaan (3-7)**, $\Phi = 0$ sehingga dari **Persamaan (3-6)** diperoleh $E = 0$. Dengan kata lain, tidak ada medan listrik di dalam bola konduktor bermuatan.

b. Di Permukaan Bola Konduktor

Muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan bola Gauss tepat sama dengan muatan total bola konduktor, $q = Q$. Luas permukaan Gauss $A = 4\pi R^2$ sehingga fluks listriknya

$$\Phi = EA = E(4\pi R^2)$$

Substitusikan persamaan tersebut ke **Persamaan (3-7)** maka

$$E(4\pi R^2) = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

sehingga diperoleh medan listrik di permukaan bola

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} = k \frac{Q}{R^2} \quad (3-9)$$

Kata Kunci

- Bola konduktor bermuatan
- Permukaan Gauss

c. Di Luar Bola

Muatan listrik yang dilingkupi permukaan bola Gauss sama dengan muatan total dalam bola konduktor, $q = Q$. Luas permukaan bola Gauss

$$A = 4\pi r^2$$

sehingga fluks listriknya

$$\Phi = EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Dengan demikian, medan listrik di luar bola dinyatakan dengan persamaan

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2} \quad (3-10)$$

Contoh 3.10

Bola konduktor berjari-jari 5 cm diberi muatan listrik merata dengan total $20 \mu\text{C}$. Tentukan kuat medan listrik pada jarak:

- 2,5 cm,
- 5 cm, dan
- 10 cm dari pusat bola.

Jawab

Diketahui: $R = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$ dan $Q = 20 \mu\text{C} = 20 \times 10^{-6} \text{ C}$.

- Jarak $r = 2,5 \text{ cm}$ berada di dalam bola ($r < R$) maka kuat medan listriknya $E = 0$.
- Jarak $r = 5 \text{ cm}$ tepat di permukaan bola ($r = R$) maka kuat medan listriknya

$$E = k \frac{Q}{R^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(20 \times 10^{-6} \text{ C})}{(5 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 7,2 \times 10^7 \text{ N/C}.$$

- Jarak $r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ berada di luar bola ($r > R$) maka kuat medan listriknya

$$E = k \frac{Q}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(20 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,1 \text{ m})^2} = 1,8 \times 10^7 \text{ N/C}.$$

Soal Penguasaan Materi 3.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah muatan uji $q = 1 \mu\text{C}$ diletakkan di titik A yang berjarak 15 cm dari sebuah sumber muatan titik. Muatan uji ini mendapat gaya sebesar 2 N dengan arah menuju ke sumber muatan. Tentukan:
 - besar dan arah kuat medan listrik di titik A, dan
 - jenis muatan sumber.
- Medan listrik seragam sebesar 200 N/C menembus bidang persegi dengan ukuran $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. Tentukan fluks listrik yang dilingkupi bidang tersebut jika medan listriknya:
 - menembus tegak lurus bidang,
 - membentuk sudut 30° terhadap bidang, dan
 - sejajar bidang.
- Sebuah bola konduktor bermuatan Q tersebar merata di permukaan bola.
 - Gambarkan grafik medan listrik E terhadap r yang dihasilkan bola konduktor tersebut.
 - Gambarkan pula grafik medan listrik E terhadap r yang dihasilkan oleh sumber muatan titik.
 - Bandingkan kedua grafik tersebut. Apakah kesimpulan Anda?

D Potensial Listrik

Besaran lain yang berkaitan dengan keberadaan muatan listrik adalah *potensial listrik*. Berbeda dengan gaya Coulomb dan medan listrik yang merupakan besaran vektor, potensial listrik merupakan besaran skalar, yakni hanya memiliki nilai, tidak memiliki arah.

Untuk menentukan potensial listrik di suatu titik, perhatikanlah **Gambar 3.9**. Misalnya, ada muatan listrik positif q di dalam medan listrik E . Pada muatan tersebut akan bekerja gaya F yang searah dengan E . Untuk memindahkan q dari A ke B diperlukan usaha (W_{AB}) untuk melawan gaya listrik F . Dari Hukum Kekekalan Energi, usaha untuk memindahkan muatan sama dengan perbedaan energi potensial listrik, $W_{AB} = \Delta EP = EP_B - EP_A$. Beda potensial listrik di titik B terhadap A didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik dari titik A ke titik B dibagi besar muatan yang dipindahkan. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$V_{BA} = V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{EP_B - EP_A}{q} \quad (3-11)$$

Potensial listrik di titik B dapat ditentukan dengan membuat $V_A = 0$. Hal ini dapat dilakukan dengan menghubungkan titik A ke tanah. Dengan demikian, dari **Persamaan (3-11)** diperoleh potensial listrik di titik B sebagai berikut.

$$V_B = \frac{Ep_B}{q} \quad (3-12)$$

Satuan potensial listrik dan beda potensial adalah joule/coulomb (J/C) dan diberi nama khusus volt (V). $1V = 1 \text{ J/C}$. Muatan positif secara alami bergerak dari potensial tinggi ke potensial rendah, sebaliknya muatan negatif bergerak dari potensial rendah ke potensial tinggi. Beda potensial umumnya disebut dengan *tegangan*.

Ada hubungan yang sangat erat antara potensial listrik dan medan listrik. Jika medan listrik pada **Gambar 3.9** homogen, usaha yang dilakukan oleh medan listrik untuk menggerakkan muatan positif q dari B ke A adalah

$$W = qEd = qV_{AB}$$

Mengingat bahwa $W = Fd$ dan $F = qE$ maka

$$W = qEd = qV_{AB}$$

sehingga diperoleh

$$V_{AB} = Ed \quad \text{atau} \quad E = \frac{V_{AB}}{d} \quad (3-13)$$

dengan d = jarak antara titik A dan B.

Dari **Persamaan (3-13)** satuan medan listrik dapat ditulis dalam bentuk volt per meter (V/m). Adapun arah medan listriknya adalah dari titik berpotensial tinggi ke titik berpotensial rendah.

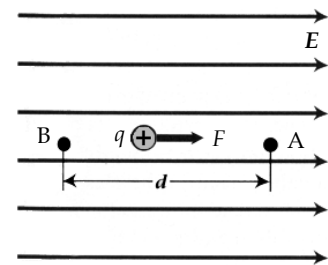
Contoh 3.11

Untuk memindahkan muatan $q = 1 \mu\text{C}$ dari suatu titik A ke titik B diperlukan usaha sebesar $2 \times 10^{-4} \text{ J}$. Tentukan:

- V_{BA} dan
- V_{AB} .

Kata Kunci

- Energi potensial listrik
- Potensial listrik



Gambar 3.9

Usaha diperlukan untuk memindahkan muatan dari titik A ke titik B.



Jawab

Diketahui: $q = 1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{C}$ dan $W_{AB} = 2 \times 10^{-4} \text{J}$ maka

$$\text{a. } V_{BA} = V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{2 \times 10^{-4} \text{J}}{10^{-6} \text{C}} = 2 \times 10^2 \text{V}$$

$$\text{b. } V_{AB} = V_A - V_B = -V_{BA} = -2 \times 10^2 \text{V}$$

Loncatan Kuantum



Sumber: www.someonewhocares.com

Petir merupakan pelepasan muatan listrik statis yang besar secara tiba-tiba yang terbentuk di dalam awan badai.

Quantum Leap

Lightning is the sudden release of giant charge of static electricity that builds up inside storm clouds.

Sumber: Science Library, 2004

Contoh 3.12

Sebuah elektron dilepas tanpa kecepatan awal dari katode dan bergerak menuju anode. Potensial anode adalah 200 V lebih tinggi daripada katoda. Diketahui muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ dan massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$.

- Tentukan energi potensial elektron ketika berada di katoda, relatif terhadap anode.
- Berapakah kecepatan elektron saat menumbuk anoda?

Jawab

Diketahui: $V_{AK} = 200 \text{V}$ (A = anode, K = katode), $q = -1,6 \times 10^{-19} \text{C}$, dan $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$.

- Energi potensial elektron di katoda relatif terhadap anode (lihat **Persamaan (3-11)**)

$$EP_{KA} = EP_K - EP_A = qV_{KA} = -qV_{AK} = -(-1,6 \times 10^{-19} \text{C})(200 \text{V}) = 3,2 \times 10^{-17} \text{J}$$

- Jika elektron dilepas dari katode, energi potensial elektron di katode relatif terhadap anode akan berubah menjadi energi kinetik (sebagai analogi, bayangkan benda jatuh bebas). Oleh karena berlaku Hukum Kekekalan Energi, saat tiba di anode, energi potensial elektron berubah seluruhnya menjadi energi kinetik,

$$EP_{KA} = \Delta EK = \frac{1}{2}mv^2 - 0 = \frac{1}{2}mv^2$$

karena energi kinetik awalnya nol. Dengan demikian, kecepatan elektron saat

$$\text{menumbuk anode adalah } v = \sqrt{\frac{2EP_{KA}}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(3,2 \times 10^{-17} \text{J})}{(9,1 \times 10^{-31} \text{kg})}} = 8,4 \times 10^6 \text{m/s}.$$

Contoh 3.13

Dua buah pelat sejajar diberi beda potensial 20 V sehingga terdapat medan listrik seragam di antara kedua pelat. Jarak antara kedua pelat 5 cm.

- Tentukan besar kuat medan listrik tersebut.
- Jika muatan $q = 2,5 \mu\text{C}$ disimpan di antara kedua pelat, berapa gaya yang dialami muatan tersebut?

Jawab

Diketahui: $V_{12} = 20 \text{V}$, $d = 5 \text{cm} = 5 \times 10^{-2} \text{m}$, dan $q = 2,5 \mu\text{C} = 2,5 \times 10^{-6} \text{C}$.

- Kuat medan listrik di antara kedua pelat adalah

$$E = \frac{V_{12}}{d} = \frac{20 \text{V}}{5 \times 10^{-2} \text{m}} = 4 \times 10^2 \text{V/m}.$$

- Gaya yang dialami muatan q adalah

$$F = qE = (2,5 \times 10^{-6} \text{C})(4 \times 10^2 \text{V/m}) = 10^{-3} \text{N}.$$

1. Potensial Listrik oleh Benda Titik Bermuatan

Potensial yang dihasilkan oleh sebuah muatan titik diturunkan dengan bantuan kalkulus integral (tidak diturunkan di sini). Potensial listrik pada suatu titik yang berjarak r dari sebuah muatan titik Q dinyatakan oleh persamaan

$$V = k \frac{Q}{r} \quad (3-14)$$

dengan V menyatakan potensial mutlak di suatu titik. Pada $r = \infty$ (tak terhingga), $V = 0$. Dengan kata lain, V merupakan beda potensial antara r dan tidak terhingga.

Oleh karena potensial listrik merupakan besaran skalar, nilainya di suatu titik dapat positif dan dapat pula negatif, bergantung pada muatan sumbernya. Potensial di suatu titik akibat beberapa muatan sumber sama dengan jumlah potensial listrik oleh setiap muatan. Secara matematis, potensial listrik oleh N buah muatan sumber ditulis

$$V = V_1 + V_2 + \dots = k \frac{Q_1}{r_1} + k \frac{Q_2}{r_2} + \dots = k \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{r_i} \quad (3-15)$$

Contoh 3.14

Titik P terletak pada jarak 15 cm dari muatan listrik $3 \mu\text{C}$ dan 20 cm dari muatan listrik $-5 \mu\text{C}$. Tentukan potensial listrik di titik P yang dihasilkan oleh:

- muatan pertama,
- muatan kedua, dan
- kedua muatan.

Jawab

Diketahui: $Q_1 = 3 \mu\text{C} = 3 \times 10^{-6} \text{C}$, $r_1 = 15 \text{cm} = 0,15 \text{m}$, $Q_2 = -5 \mu\text{C} = -5 \times 10^{-6} \text{C}$, dan $r_2 = 20 \text{cm} = 0,2 \text{m}$.

- Potensial listrik di titik P oleh Q_1 adalah

$$V_1 = k \frac{Q_1}{r_1} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{C})}{(0,15 \text{m})} = 180 \times 10^3 \text{V}.$$

- Potensial listrik di titik P oleh Q_2 adalah

$$V_2 = k \frac{Q_2}{r_2} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(-5 \times 10^{-6} \text{C})}{(0,2 \text{m})} = -225 \times 10^3 \text{V}.$$

- Potensial listrik di titik P oleh kedua muatan adalah

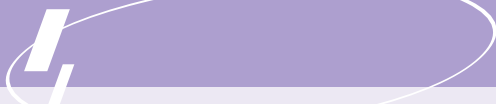
$$V_p = V_1 + V_2 = (180 \times 10^3 \text{V}) + (-225 \times 10^3 \text{V}) = -45 \times 10^3 \text{V}.$$

Contoh 3.15

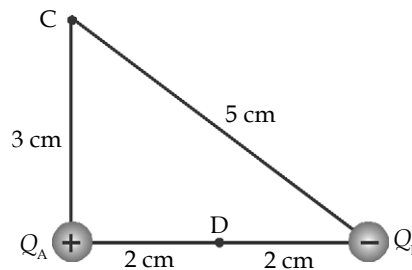
Tiga buah muatan listrik masing-masing $2,5 \mu\text{C}$, $-2,5 \mu\text{C}$, dan $-2,5 \mu\text{C}$ berturut-turut diletakkan pada titik-titik sudut sebuah segitiga ABC, siku-siku di A. Jarak AB = 4 cm dan jarak AC = 3 cm. Titik D berada pada garis AB, tepat di tengah-tengahnya. Tentukan usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik dari titik C ke titik D.

Jawab

Dari **Persamaan (3-11)**, usaha untuk memindahkan muatan q dari titik C ke titik D adalah $W_{CD} = q(V_D - V_C)$. Oleh karena itu, terlebih dahulu Anda tentukan potensial listrik di titik C dan D yang dihasilkan oleh muatan di titik A dan B (muatan di C tidak dilibatkan karena muatan tersebut adalah muatan yang dipindahkan).



Diketahui $Q_A = 2,5 \mu C = 2,5 \times 10^{-6} C$, $Q_B = -2,5 \mu C = -2,5 \times 10^{-6} C$, dan $q = -2,5 \mu C = -2,5 \times 10^{-6} C$. Perhatikan gambar berikut.



Jarak $AC = r_{AC} = 3 \text{ m} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$, jarak $AD = BD = r_{AD} = r_{BD} = \frac{1}{2} AB = 2 \text{ cm}$. Jarak BC dapat ditentukan dengan dalil Pythagoras, $r_{AB} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$. Potensial listik di titik C adalah

$$V_C = k \left[\frac{Q_A}{r_{AC}} + \frac{Q_B}{r_{BC}} \right] = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \left[\frac{2,5 \times 10^{-6} \text{ C}}{3 \times 10^{-2} \text{ m}} + \frac{-2,5 \times 10^{-6} \text{ C}}{5 \times 10^{-2} \text{ m}} \right] = 3 \times 10^5 \text{ V},$$

sedangkan potensial di titik D adalah

$$V_D = k \left[\frac{Q_A}{r_{AD}} + \frac{Q_B}{r_{BD}} \right] = (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \left[\frac{2,5 \times 10^{-6} \text{ C}}{2 \times 10^{-2} \text{ m}} + \frac{-2,5 \times 10^{-6} \text{ C}}{2 \times 10^{-2} \text{ m}} \right] = 0.$$

Dengan demikian, usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan q dari titik C ke titik D adalah

$$W_{CD} = q(V_D - V_C) = (-2,5 \times 10^{-6} \text{ C})(0 - 3 \times 10^5 \text{ V}) = 0,75 \text{ J}.$$

Jelajah Fisika

Generator Van de Graaf



Ilmuwan Amerika, Robert Van de Graaf (1901–1967), pada awal 1930-an mengembangkan mesin untuk mengumpulkan dan menyimpan jumlah muatan listrik yang sangat besar. Pada gambar di atas tampak Van de Graaf bersama generator elektro statik hasil ciptaannya. Muatan di dalam mesin dibentuk dari bola logam dan mencapai tegangan 10 juta volt. Mesin ini umumnya digunakan sebagai alat penelitian untuk mempelajari partikel-partikel pembentuk atom.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

2. Potensial Listrik oleh Bola Konduktor Bermuatan

Pada subbab sebelumnya, telah Anda ketahui bahwa medan listrik di luar bola memenuhi **Persamaan (3-10)**. **Persamaan (3-10)** ini sama dengan **Persamaan (3-4)**. Hal ini menunjukkan bahwa bola konduktor berjari-jari R dapat dipandang sebagai muatan titik ketika jarak titik ke pusat bola lebih besar daripada jari-jari bola.

Potensial listrik yang dihasilkan bola konduktor bermuatan pada suatu titik di luar bola ($r > R$) diperoleh dengan memandang bola konduktor sebagai muatan titik. Oleh karena itu, potensial listrik di luar bola memenuhi **Persamaan (3-14)**, yakni

$$V = k \frac{Q}{r} \quad (3-16)$$

Selanjutnya, potensial pada permukaan bola diperoleh dengan memasukkan $r = R$, yakni

$$V = k \frac{Q}{R} \quad (3-17)$$

Bagaimanakah persamaan potensial listrik di dalam bola? Seperti telah Anda ketahui bahwa medan listrik di dalam bola adalah $E = 0$. Hal ini menunjukkan bahwa jika Anda hendak memindahkan muatan lain (q) di dalam bola, Anda tidak memerlukan usaha karena muatan q tidak mendapatkan gaya listrik. Dari **Persamaan (3-11)**, tidak adanya usaha ($W = 0$) menunjukkan bahwa beda potensial antara dua titik didalam bola sama dengan nol ($V_{AB} = 0$)

sehingga $V_A = V_B$. Dengan kata lain, potensial di setiap titik dalam bola adalah sama dan besarnya sama dengan potensial di permukaan bola, seperti yang diberikan pada **Persamaan (3-17)**.

Contoh 3.16

Sebuah bola konduktor berjari-jari 20 cm bermuatan listrik $1 \mu\text{C}$. Tentukan potensial listrik pada jarak:

- 10 cm, dan
- 30 cm dari pusat bola.

Jawab

Diketahui: $Q = 1 \mu\text{C} = 1 \times 10^{-6} \text{C}$ dan $R = 20 \text{cm} = 20 \times 10^{-2} \text{m}$.

- Potensial listrik pada jarak $r = 10 \text{cm}$ ($r < R$, di dalam bola) adalah

$$V = k \frac{Q}{R} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(1 \times 10^{-6} \text{C})}{(20 \times 10^{-2} \text{m})} = 4,5 \times 10^4 \text{V}.$$

- Potensial listrik pada jarak $r = 30 \text{cm}$ ($r > R$, di luar bola) adalah

$$V = k \frac{Q}{r} = (9 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(1 \times 10^{-6} \text{C})}{(30 \times 10^{-2} \text{m})} = 3 \times 10^4 \text{V}.$$

Soal Penguasaan Materi 3.4

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

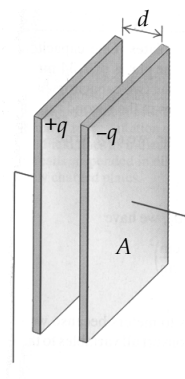
- Usaha yang diperlukan untuk memindahkan 1 C dari titik A ke B adalah 25 J. Titik A dihubungkan ke tanah.
 - Berapakah energi potensial listrik muatan?
 - Berapakah potensial listrik ke titik B?
- Muatan listrik sebesar 45 C dipindahkan dari suatu titik dengan potensial listrik 10 V ke titik lain dengan potensial listrik 50 V.
 - Tentukan usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan tersebut.
 - Berapakah pertambahan energi muatannya?
- Potensial listrik pada suatu titik yang berjarak 15 cm dari sumber muatan titik adalah -600V .
 - Tentukan besar dan arah kuat medan listrik di titik tersebut.
 - Berapakah gaya yang akan dialami muatan $q = 2 \mu\text{C}$ jika disimpan di titik tersebut?
- Sebuah bola konduktor bermuatan listrik $2,5 \mu\text{C}$. Jari-jari bola 15 cm. Tentukan potensial listrik dan medan listrik pada suatu titik yang berjarak:
 - 5 cm dari pusat bola, dan
 - 20 cm dari pusat bola.

E Kapasitor

Kapasitor atau kondensator adalah alat yang dapat menyimpan muatan listrik atau energi listrik. Kapasitor banyak digunakan dalam rangkaian elektronik sebagai cadangan energi yang dapat digunakan ketika diperlukan. Kapasitor umumnya terdiri atas dua buah pelat atau lembaran logam yang diletakkan sejajar dan berdekatan tapi tidak bersentuhan, seperti diperlihatkan pada **Gambar 3.10**.

1. Kapasitas Kapasitor

Besaran yang menyatakan kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan atau energi disebut *kapasitansi* atau *kapasitas kapasitor*. Nilai kapasitansi bergantung pada dimensi dan medium dalam kapasitor itu sendiri. Kapasitas



Gambar 3.10

Kapasitor keping sejajar.

Jelajah Fisika

Guci Leyden



Guci Leyden adalah alat pertama yang digunakan oleh ilmuwan untuk menyimpan muatan listrik yang mereka buat. Nama alat tersebut diambil dari tempat di mana alat tersebut dikembangkan pada tahun 1746, yaitu Universitas Leyden, Belanda. Guci Leyden merupakan jenis kapasitor pertama.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

untuk kapasitor pelat sejajar yang luas pelatnya A , jarak antarpelatnya d , dan berisi udara di antara kedua pelatnya, adalah

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{3-18}$$

Jika antarpelatnya diisi bahan dielektrik dengan konstanta dielektrik K , kapasitansinya menjadi

$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{3-19}$$

Satuan kapasitansi adalah farad, disingkat F.

Ketika kapasitor diberi beda potensial V (dihubungkan ke baterai), kapasitor tersebut segera terisi muatan. Salah satu pelat menerima muatan positif dan yang lainnya muatan negatif. Proses pengisian muatan pada kapasitor umumnya berlangsung singkat dan ketika keadaan tunak (mantap) dicapai atau kapasitor telah terisi muatan maksimum, tidak ada pengisian muatan lagi dan tidak ada aliran arus listrik. Jumlah muatan yang dapat tersimpan didalam kapasitor sebanding dengan beda potensial V dan secara matematis ditulis sebagai berikut

$$Q = CV \tag{3-20}$$

Sementara itu, energi yang dapat tersimpan dalam kapasitor memenuhi persamaan

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \tag{3-21}$$

Contoh 3.17

Sebuah kapasitor terbuat dari dua keping sejajar. Luas tiap keping 2 cm^2 dan jarak antarkeping $1,5 \text{ mm}$. Medium di antara kedua keping adalah dielektrik dengan konstanta 6.

- Tentukan kapasitas kapasitor.
- Jika kapasitor ini dihubungkan dengan baterai 10 V , berapa muatan dan energi listrik yang dapat disimpan di dalamnya?

Jawab

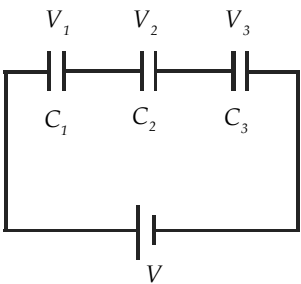
Diketahui: $A = 2 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $d = 1,5 \text{ mm} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $K = 6$, dan $V = 12 \text{ V}$.

- Kapasitas kapasitor jika bahan di antara kedua kepingnya udara adalah

$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = (6) \left(8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \right) \frac{(2 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{(1,5 \times 10^{-3} \text{ m})} = 7,2 \times 10^{-12} \text{ F}.$$

- Muatan dan energi yang dapat disimpan dalam kapasitor adalah
 $Q = CV = (7,2 \times 10^{-12} \text{ F})(10 \text{ V}) = 72 \times 10^{-12} \text{ C}$

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (7,2 \times 10^{-12} \text{ F})(10^2 \text{ V}^2) = 3,6 \times 10^{-10} \text{ J}.$$



Gambar 3.11
Kapasitor-kapasitor tersusun seri.

2. Rangkaian Kapasitor

Dalam rangkaian listrik, kapasitor dapat disusun secara seri, paralel, atau gabungan seri dan paralel. Kapasitor diberi simbol $\text{—}||\text{—}$.

a. Rangkaian Seri Kapasitor

Gambar 3.11 memperlihatkan tiga buah kapasitor (C_1 , C_2 , dan C_3) yang dirangkai seri. Ketika rangkaian ini dihubungkan dengan baterai yang memiliki tegangan V , kapasitor akan terisi muatan listrik yang sama

($Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$). Dengan menggunakan hubungan $Q = CV$, tegangan pada setiap kapasitor memenuhi hubungan

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} ; V_2 = \frac{Q}{C_2} ; \text{ dan } V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

Tegangan baterai sama dengan jumlah tegangan dari setiap kapasitor, yakni

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

sehingga diperoleh kapasitansi ekivalennya

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

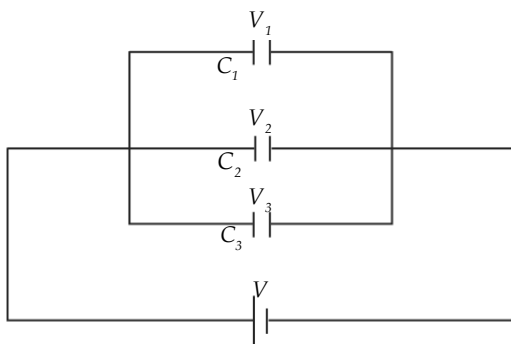
atau

$$\boxed{\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad (3-22)$$

Persamaan (3-23) menunjukkan bahwa kapasitansi ekivalen untuk kapasitor-kapasitor seri selalu lebih kecil daripada kapasitansi terkecil dalam rangkaian tersebut.

b. Rangkaian Paralel Kapasitor

Gambar 3.12 memperlihatkan tiga buah kapasitor (C_1 , C_2 , dan C_3) yang dirangkai paralel.



Gambar 3.12
Kapasitor-kapasitor tersusun paralel.

Pada rangkaian tersebut, setiap kapasitor memiliki tegangan yang sama, tetapi muatan berbeda, masing-masing memenuhi hubungan sebagai berikut.

$$Q_1 = C_1 V, Q_2 = C_2 V, Q_3 = C_3 V$$

Muatan total yang disimpan pada ketiga kapasitor adalah

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)V$$

dan kapasitansi ekivalennya adalah

$$C_p = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3-23)$$

Persamaan (3-23) menunjukkan bahwa kapasitansi kapasitor-kapasitor paralel lebih besar dari pada kapasitansi setiap kapasitor dalam rangkaian tersebut.

Kata Kunci

- Kapasitor
- Kapasitas kapasitor
- Rangkaian seri kapasitor
- Rangkaian paralel kapasitor

Contoh 3.17

Tiga buah kapasitor dengan kapasitansi $2\ \mu\text{F}$, $3\ \mu\text{F}$, dan $6\ \mu\text{F}$ dirangkai seri dan dihubungkan dengan baterai $12\ \text{V}$. Tentukan:

- kapasitansi ekuivalen ketiga kapasitor,
- muatan yang tersimpan pada tiap kapasitor, dan
- tegangan tiap kapasitor.

Jawab

Diketahui: $C_1 = 2\ \mu\text{F}$, $C_2 = 3\ \mu\text{F}$, $C_3 = 6\ \mu\text{F}$, dan $V = 12\ \text{V}$.

- Kapasitansi ekuivalen untuk rangkaian seri adalah

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} + \frac{2}{6} + \frac{1}{6} = \frac{6}{6} = \frac{1}{1}$$

sehingga diperoleh $C_s = 1\ \mu\text{F}$.

- Muatan pada setiap kapasitor adalah sama yakni

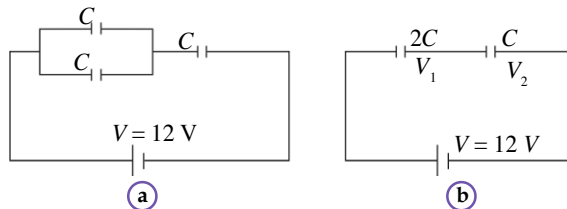
$$Q = C_s V = (1\ \mu\text{F})(12\ \text{V}) = 12\ \mu\text{C}.$$

- Tegangan pada setiap kapasitor adalah

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{12\ \mu\text{C}}{2\ \mu\text{F}} = 6\ \text{V}; \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{12\ \mu\text{C}}{3\ \mu\text{F}} = 4\ \text{V}; \quad \text{dan} \quad V_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{12\ \mu\text{C}}{6\ \mu\text{F}} = 2\ \text{V}.$$

Contoh 3.18

Tiga buah kapasitor identik dengan kapasitansi C dirangkai seperti diperlihatkan pada **Gambar (a)**.



- Tentukan kapasitansi ekuivalen rangkaian tersebut.
- Berapakah beda potensial setiap kapasitor?

Jawab

- Pada **Gambar (a)** terlihat bahwa dua kapasitor dirangkai paralel, kemudian seri dengan kapasitor lainnya. Untuk kapasitor-kapasitor paralel, kapasitansi ekuivalennya adalah $C + C = 2C$. Kapasitansi $2C$ tersebut dirangkai seri dengan kapasitansi C , seperti pada **Gambar (b)**, maka

$$\frac{1}{C_{ek}} = \frac{1}{2C} + \frac{1}{C} = \frac{1}{2C} + \frac{2}{2C} = \frac{3}{2C}$$

sehingga diperoleh

$$C_{ek} = \frac{2C}{3}.$$

- Dari **Gambar (b)**, karena muatan pada tiap kapasitor ($2C$ dan C) sama, perbandingan tegangan pada kedua kapasitor tersebut adalah $V = \frac{Q}{C}$

$$V_1 : V_2 = \frac{1}{2C} : \frac{1}{C} = 1 : 2$$

Dengan demikian, tegangan pada tiap kapasitor adalah

$$V_1 = \frac{1}{1+2} V = \frac{1}{3} (12\text{V}) = 4\ \text{V} \quad \text{dan} \quad V_2 = \frac{2}{1+2} V = \frac{2}{3} (12\text{V}) = 8\ \text{V}.$$

Soal Penguasaan Materi 3.5

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Kapasitansi kapasitor keping sejajar yang terdapat udara di antara kedua kepingnya adalah C . Jika medium di antara kedua keping diganti dengan dielektrik yang konstantanya 4 dan jarak antarkeping dijadikan 0,5 kali semula, berapakah kapasitansinya sekarang?
2. Kapasitor keping sejajar dengan luas setiap keping 10 cm^2 dan antarkeping terpisah pada jarak 3 mm dihubungkan dengan baterai 12 V. Medium di antara kedua keping adalah dielektrik dengan konstanta 6. Tentukan:
 - a. kapasitansi kapasitor,
 - b. muatan yang dapat tersimpan pada kapasitor, dan
 - c. energi yang dapat tersimpan dalam kapasitor.
3. Tiga buah kapasitor dengan kapasitansi $2 \mu\text{F}$, $6 \mu\text{F}$, dan $12 \mu\text{F}$. Kemudian, rangkaian ini dihubungkan dengan baterai 90 V. Tentukanlah tegangan setiap kapasitor.
4. Dua buah kapasitor identik dengan kapasitansi C hendak dihubungkan dengan sebuah baterai. Mula-mula hanya sebuah kapasitor dihubungkan ke baterai dan ternyata energi yang dapat tersimpan padanya adalah E . Jika kedua kapasitor dihubungkan seri dan dihubungkan ke baterai, berapa energi yang dapat tersimpan pada kapasitor tersebut? Nyatakanlah dalam E .

Kerjakanlah

1. Apakah penggosokan merupakan proses memberikan muatan pada bahan yang digosok? Apa sebenarnya yang terjadi saat dilakukan penggosokan, misalnya ketika mistar plastik digosok oleh kain?
2. Dapatkah benda tak bermuatan ditarik oleh benda bermuatan listrik? Mengapa demikian?
3. Apakah gaya interaksi antara dua muatan listrik termasuk gaya aksi-reaksi? Mengapa demikian?
4. Gambarkanlah garis-garis gaya magnet di sekitar dua muatan positif yang terpisah pada jarak r .
5. Elektron dilepaskan di dekat pelat negatif dari kapasitor. Apakah elektron akan bergerak lurus? Mengapa demikian?

Pembahasan Soal *SPMB*

Dua buah kapasitor identik yang mula-mula belum bermuatan akan dihubungkan dengan baterai 10 V. Jika hanya salah satu yang dihubungkan dengan baterai tersebut, energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah E . Energi yang akan tersimpan jika kedua kapasitor tersebut dihubungkan seri dengan baterai adalah

- a. $\frac{E}{4}$
- b. $\frac{E}{2}$
- c. E
- d. $2E$
- e. $4E$

Penyelesaian

Diketahui: Dua kapasitor identik dengan kapasitansi C ,
 $V = 10$ volt, dan
 $E =$ energi yang tersimpan dalam sebuah kapasitor.

Energi yang tersimpan pada kapasitor memenuhi persamaan

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

Untuk tegangan tetap adalah

$$E \sim C$$

Hal ini menunjukkan bahwa energi sebanding dengan kapasitas. Ketika dua kapasitor dengan kapasitansi C dihubungkan seri, kapasitasnya menjadi

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C}$$

$$C_s = \frac{1}{2}C$$

atau setengah kali semula. Oleh karena itu, energi yang tersimpan menjadi setengah kali semula, yakni

$$W = \frac{1}{2}E$$

Jawab: b

UMPTN 2001

Rangkuman

1. **Hukum Coulomb** menyatakan bahwa gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua muatan listrik berbanding lurus dengan besar setiap muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \mathbf{r}$$

2. **Medan listrik** adalah ruang atau daerah yang masih dipengaruhi gaya listrik. Besaran yang digunakan untuk menyatakan medan listrik disebut **kuat medan listrik** (E).

$$E = \frac{F}{q_0}$$

3. **Hukum Gauss** menyatakan bahwa jumlah garis gaya medan listrik yang menembus suatu permukaan tertutup sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tertutup tersebut.

$$E \perp A$$

4. Medan listrik di dalam bola konduktor bermuatan $E = 0$, sedangkan di permukaan bola konduktor bermuatan

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} = k \frac{Q}{R^2} \mathbf{r}$$

dan di luar bola konduktor bermuatan

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2} \mathbf{r}$$

5. **Beda potensial** listrik di titik B terhadap A didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik dari titik A ke titik B dibagi besar muatan yang dipindahkan.

$$V_{BA} = V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{EP_B - EP_A}{q}$$

6. Potensial listrik pada suatu titik berjarak r dari sebuah muatan titik Q adalah

$$V = k \frac{Q}{r}$$

sedangkan untuk beberapa muatan sumber adalah

$$V = k \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{r_i}$$

7. Potensial listrik di luar bola adalah

$$V = k \frac{Q}{r}$$

Potensial listrik di permukaan bola dan di setiap titik dalam bola adalah

$$V = k \frac{Q}{R}$$

8. **Kapasitor** adalah alat yang dapat menyimpan muatan listrik atau energi listrik. Besaran yang menyatakan kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan atau energi disebut kapasitansi atau kapasitas kapasitor. Nilai **kapasitansi** bergantung pada dimensi dan medium dalam kapasitor itu sendiri. Secara umum

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d}$$

9. Pada rangkaian **seri kapasitor** berlaku persamaan

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} : V_2 = \frac{Q}{C_2} : V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

$$C_s = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q \left[\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right]} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

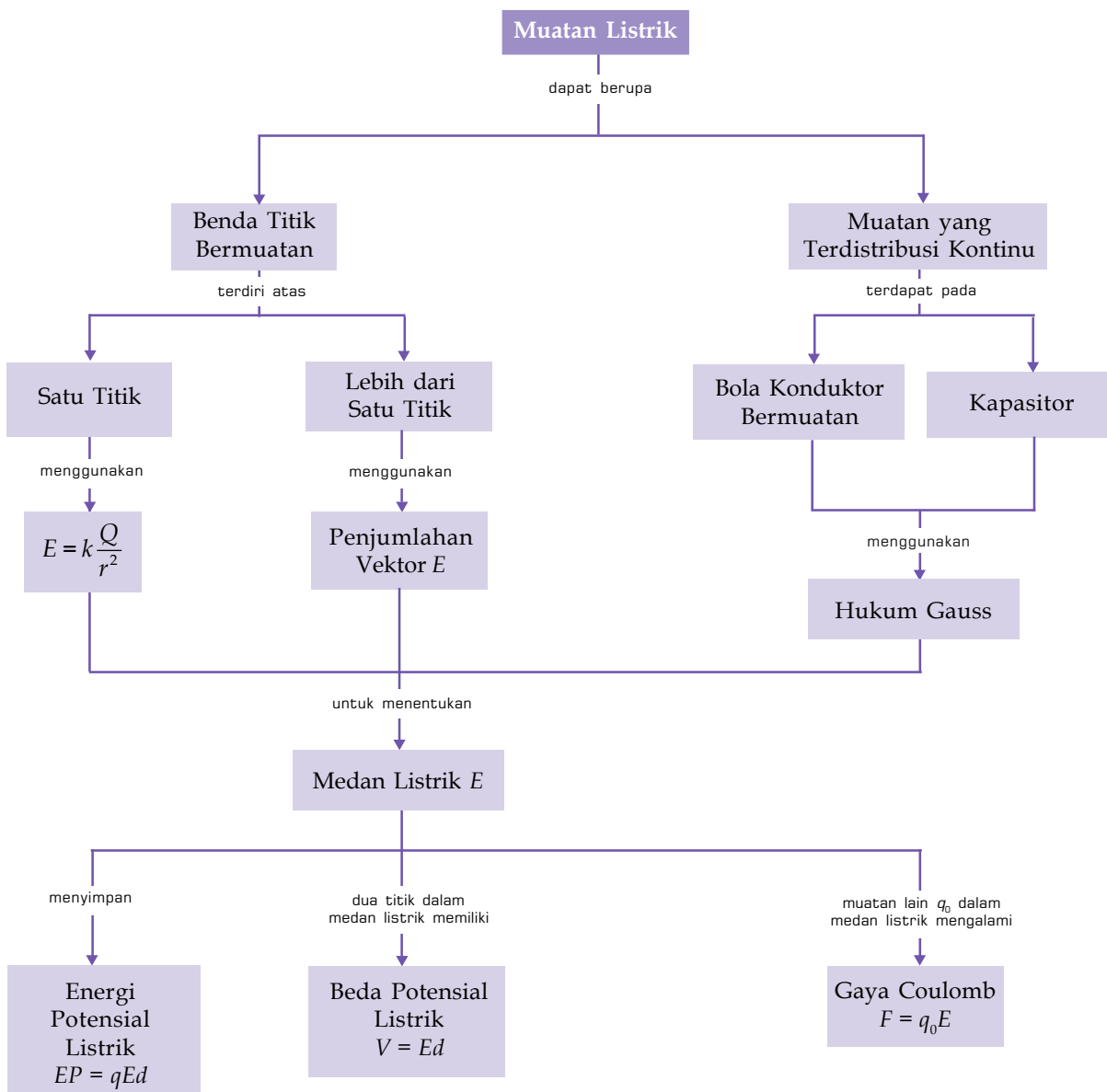
10. Untuk rangkaian **paralel kapasitor** berlaku persamaan

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

$$Q_1 = C_1 \cdot V; Q_2 = C_2 \cdot V; Q_3 = C_3 \cdot V$$

$$C_p = \frac{Q}{V} = \frac{(C_1 \cdot V + C_2 \cdot V + C_3 \cdot V)}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

Peta Konsep



Kaji Diri

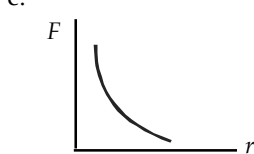
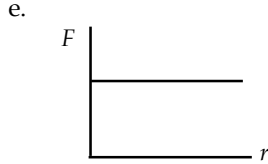
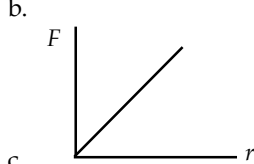
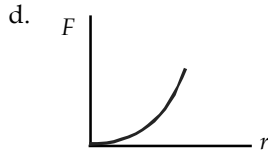
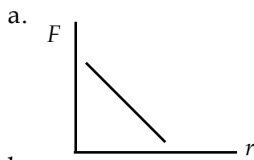
Setelah mempelajari bab Elektrostatika, Anda dapat memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik, serta penerapannya pada keping sejajar. Jika Anda belum mampu memformulasikan gaya listrik, kuat medan magnet, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik, serta penerapannya pada keping sejajar, Anda belum

menguasai materi bab Elektrostatika dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 3

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

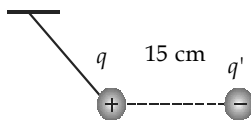
1. Dua benda bermuatan $+q_1$ dan $+q_2$ berjarak r satu sama lain. Jika jarak r diubah-ubah, grafik yang menyatakan hubungan gaya interaksi kedua muatan F dengan r adalah



2. Dua buah muatan listrik saling menolak dengan gaya F pada jarak tertentu. Jika jaraknya dijadikan dua kali semula, gaya tolaknya menjadi

- $\frac{1}{4}F$
- $\frac{1}{2}F$
- F
- $2F$
- $4F$

3. Sebuah benda bermassa 20 gram dan bermuatan $q = +0,5 \mu\text{C}$ digantungkan pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat di sebelah kanan benda pada jarak 15 cm diletakkan muatan $q' = -1 \mu\text{C}$ yang menyebabkan posisi benda menjadi seperti pada gambar.



Jika $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tegangan pada tali adalah

- 0,2 N
- 0,24 N
- 0,28 N
- 0,4 N
- 0,32 N

4. Pada titik-titik sudut A, B, C, D, sebuah persegi ABCD dengan panjang a , berturut-turut ditempatkan muatan $+q$, q , q , dan q . Muatan $+q$ mengalami resultan gaya dari muatan lain sebesar $\left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon a^2}\right)$ maka x adalah

- $\sqrt{2}$
- $\sqrt{2} + 2$
- $\frac{1}{\sqrt{2}}$
- $\left(\sqrt{2} + \frac{1}{2}\right)$
- $\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2}\right)$

5. Kuat medan listrik di suatu titik P yang ditimbulkan oleh sebuah muatan q di titik asal O,
- 1) arahnya menjauhi q jika q positif dan menuju q jika q negatif,
 - 2) berbanding langsung dengan q ,
 - 3) berbanding terbalik dengan kuadrat jarak OP,
 - 4) arahnya sama dengan gaya Coulomb pada muatan q' di P bila q positif, dan berlawanan dengan gaya Coulomb tersebut bila q negatif.

Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, dan 3
- 1 dan 3
- 2 dan 4
- 4
- 1, 2, 3, dan 4

6. Dua partikel masing-masing bermuatan q_1 dan q_2 yang tidak diketahui besar dan jenisnya terpisah sejauh d . Pada garis hubung diantara kedua muatan tersebut terdapat titik P yang posisinya $\frac{2}{3}d$ dari q_1 . Jika kuat medan di titik P sama dengan nol, pernyataan yang benar adalah

- q_1 dan q_2 adalah muatan-muatan yang tidak sejenis
- potensial di titik P yang disebabkan oleh q_1 dan q_2 sama
- potensial di titik P sama dengan nol
- besar muatan $q_1 = 2$ kali besar muatan q_2
- besar muatan $q_1 = 4$ kali besar muatan q_2

7. Dua buah partikel A dan B masing-masing bermuatan listrik $+20 \mu\text{C}$ dan $+45 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 15 cm. Jika C adalah titik yang terletak di antara A dan B sedemikian sehingga medan di C sama dengan 0, letak C dari A adalah

- 2 cm
- 3 cm
- 4 cm
- 6 cm
- 9 cm

8. Pada titik-titik sudut B dan D sebuah persegi ABCD diletakkan sebuah partikel bermuatan $+q$. Agar kuat medan listrik di titik A nol maka di titik C harus diletakkan sebuah partikel bermuatan sebesar



- a. $-q$ d. $+q\sqrt{2}$
 b. $+q$ e. $-2q\sqrt{2}$
 c. $-q\sqrt{2}$
9. Pada keempat sudut sebuah persegi (sisi 30 cm) terletak muatan listrik. Jika dua muatan yang bertetangga adalah $+2\mu\text{C}$ dan $-2\mu\text{C}$, potensial listrik di titik pusat persegi adalah
 a. $3,4 \times 10^5\text{ volt}$ d. $-1,7 \times 10^5\text{ volt}$
 b. $-3,4 \times 10^5\text{ volt}$ e. nol
 c. $1,7 \times 10^5\text{ volt}$
10. Potensial di suatu titik yang berjarak r dari muatan Q adalah 600 V. Intensitas medan di titik tersebut adalah 400 N/C. Jika $k = 9 \times 10^9\text{ Nm}^2/\text{C}^2$, besar muatan Q adalah
 a. $2,3 \times 10^{-9}\text{ C}$
 b. $4,4 \times 10^{-8}\text{ C}$
 c. $7 \times 10^{-8}\text{ C}$
 d. $1 \times 10^{-7}\text{ C}$
 e. $1,5 \times 10^{-9}\text{ C}$
11. Segumpal awan mempunyai potensial $8 \times 10^6\text{ volt}$ terhadap Bumi. Ketika terjadi kilat antara awan dan Bumi, suatu muatan listrik sebesar 40 C dilepaskan. Banyaknya energi yang hilang pada peristiwa tersebut adalah
 a. $5 \times 10^{-6}\text{ J}$
 b. $2 \times 10^5\text{ J}$
 c. $5 \times 10^6\text{ J}$
 d. $1,6 \times 10^8\text{ J}$
 e. $3,2 \times 10^8\text{ J}$
12. Sebuah elektron dengan massa $9,1 \times 10^{-31}\text{ kg}$ dan muatan $-1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$ bergerak dari satu titik ke titik lain dalam ruang yang potensialnya 1,5 volt lebih tinggi. Energi kinetik yang diperoleh elektron dalam perpindahan kedudukan tersebut adalah
 (1 eV = $1,6 \times 10^{-19}\text{ J}$).
 a. 1 eV d. 2,5 eV
 b. 1,5 eV e. 3 eV
 c. 2 eV
13. Sebuah elektron yang mula-mula diam, kemudian bergerak melalui beda potensial 1000 V. Jika massa elektron $9,11 \times 10^{-31}\text{ kg}$ dan muatannya $-1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$, energi kinetik akhirnya adalah
 a. 1.000 J d. $-1,6 \times 10^{-31}\text{ J}$
 b. $1,6 \times 10^{-16}\text{ J}$ e. $14,6 \times 10^{-50}\text{ J}$
 c. $5,7 \times 10^{-24}\text{ J}$
14. Sebuah elektron yang mula-mula diam, kemudian bergerak melalui beda potensial 1.500 V. Jika massa elektron $9,11 \times 10^{-31}\text{ kg}$ dan muatannya $-1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$, maka energi potensialnya akan turun sebesar
 a. $16,3 \times 10^4\text{ eV}$ d. $9,11 \times 10^2\text{ eV}$
 b. $3,3 \times 10^3\text{ eV}$ e. $6,12 \times 10^2\text{ eV}$
 c. 1.500 eV
15. Dua buah elektron dengan $q = -1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$ dan $m = 9,1 \times 10^{-31}\text{ kg}$ dilepaskan dari keadaan diam pada saat berjarak $2 \times 10^{-14}\text{ m}$. Kecepatan elektron tersebut ketika keduanya berjarak $5 \times 10^{-14}\text{ m}$ adalah
 a. $0,02 \times 10^8\text{ m/s}$
 b. $0,2 \times 10^8\text{ m/s}$
 c. $0,3 \times 10^8\text{ m/s}$
 d. $0,5 \times 10^8\text{ m/s}$
 e. $0,87 \times 10^8\text{ m/s}$
16. Pada garis yang melalui titik A dan B, terdapat suatu muatan titik. Jarak titik A dan B adalah d meter. Potensial A (V_A) dikurangi potensial B (V_B) adalah V volt ($V_A < V_B$). Elektron (massa m kg dan muatan q coulomb) dilepas di titik A maka elektron tersebut
 1) bergerak dengan lintasan lurus
 2) mendapat tambahan energi qV joule
 3) mempunyai besar kecepatan akhir $\sqrt{\frac{2qV}{m}}\text{ m/s}$
 4) mempunyai percepatan $\frac{qV}{md}\text{ m/s}^2$
- Pernyataan yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3 d. 4
 b. 1 dan 3 e. 1, 2, dan 3, dan 4
 c. 2 dan 4
17. Sebuah elektron melaju di dalam tabung pesawat TV yang bertegangan 500 V. Besarnya momentum elektron tersebut saat membentur kaca TV adalah
 a. $1,2 \times 10^{-23}\text{ Ns}$
 b. $1,5 \times 10^{-23}\text{ Ns}$
 c. $1,8 \times 10^{-23}\text{ Ns}$
 d. $2 \times 10^{-23}\text{ Ns}$
 e. $2,4 \times 10^{-23}\text{ Ns}$
18. Sebuah kapasitor terbentuk dari dua lempeng aluminium yang luas permukaannya 1 m^2 , dipisahkan oleh selembar kertas parafin yang tebalnya 0,1 mm dan konstanta dielektriknya 2. Jika $\epsilon_0 = 9 \times 10^{-12}\text{ C}^2/\text{Nm}^2$, kapasitas kapasitor tersebut adalah
 a. $0,35\text{ }\mu\text{F}$
 b. $0,25\text{ }\mu\text{F}$
 c. $0,18\text{ }\mu\text{F}$
 d. $0,1\text{ }\mu\text{F}$
 e. $0,05\text{ }\mu\text{F}$
19. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas sebesar $5\text{ }\mu\text{F}$ jika ada udara di antara keping-kepingnya, dan $30\text{ }\mu\text{F}$ jika antara keping-kepingnya ditempatkan lembaran porselen. Konstanta dielektrik porselen adalah
 a. 0,17 d. 35
 b. 6 e. 150
 c. 25
20. Sebuah kapasitor keping sejajar di udara mempunyai kapasitas C . Jika jarak kedua kepingnya diubah menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula dan kedua keping dicelupkan ke dalam medium dengan konstanta dielektrikum 2, kapasitasnya menjadi
 a. $\frac{1}{4}C$ d. $2C$
 b. $\frac{1}{2}C$ e. $4C$
 c. C

21. Kapasitas kapasitor dapat diperbesar dengan cara-cara sebagai berikut:

- 1) ruang antarlempeng diisi minyak,
- 2) luas lempengnya diperbesar,
- 3) jarak kedua lempeng diperkecil,
- 4) dengan pasangan paralel beberapa kapasitor.

Pernyataan yang benar adalah

- a. 1, 2, dan 3 d. 4
- b. 1 dan 3 e. 1, 2, 3, dan 4
- c. 2 dan 4

22. Kapasitor C_1 dan C_2 yang dipasang paralel masing-masing mempunyai kapasitas $2 \mu\text{F}$ dan $4 \mu\text{F}$. Jika tegangan ujung-ujung kapasitor 12 volt, maka

- 1) kapasitas pengganti kedua kapasitor tersebut adalah $6 \mu\text{F}$,
- 2) muatan listrik C_2 adalah $18 \mu\text{C}$,
- 3) energi yang tersimpan di C_1 adalah $1,44 \times 10^{-4} \text{ J}$,
- 4) energi yang tersimpan di C_2 adalah $5,76 \times 10^{-4} \text{ J}$.

Pernyataan yang benar adalah

- a. 1, 2, dan 3 d. 4
- b. 1 dan 3 e. 1, 2, 3, dan 4
- c. 2 dan 4

23. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 F, 6 F, dan 9 F dihubungkan seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan

sumber tegangan yang besarnya 220 V. Tegangan antara ujung-ujung kapasitor yang 3 F adalah

- a. 40 V d. 120 V
- b. 60 V e. 220 V
- c. 110 V

24. Dua buah kapasitor identik yang mula-mula belum bermuatan akan dihubungkan dengan baterai 10 V. Jika hanya salah satu yang dihubungkan dengan baterai tersebut, energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah E . Energi yang akan tersimpan jika kedua kapasitor tersebut dihubungkan seri dengan baterai adalah

- a. $\frac{E}{4}$ d. $2E$
- b. $\frac{E}{2}$ e. $4E$
- c. E

25. Sebuah kapasitor dengan kapasitansi 10^{-5} F yang pernah dihubungkan beberapa saat lamanya pada beda potensial 500 V, kedua ujungnya dihubungkan dengan ujung-ujung kapasitor lain dengan kapasitansi $4 \times 10^{-5} \text{ F}$ yang tidak bermuatan. Energi yang tersimpan dalam kedua kapasitor adalah

- A. 0,25 J D. 1,25 J
- B. 0,5 J E. 1,5 J
- C. 0,1 J

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

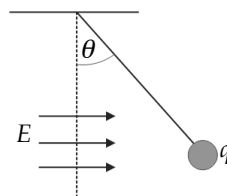
1. Gaya interaksi antara dua muatan listrik (Hukum Coulomb) mirip dengan gaya interaksi antara dua benda bermassa (Hukum Gravitasi Newton). Apakah perbedaan antara keduanya?

2. Dua buah muatan titik, Q_1 dan Q_2 , terpisah pada jarak r satu sama lain. Muatan lain $+q$ diletakkan di titik P yang berada pada garis hubung Q_1 dan Q_2 dan berjarak $\frac{1}{4} r$ dari Q_1 . Ternyata, muatan $+q$ tidak mengalami gaya.

- a. Jika Q_1 bermuatan positif, apakah jenis muatan Q_2 ? Mengapa?
- b. Jika $Q_1 = 4,0 \text{ C}$, berapakah besar Q_2 ?

3. Arah medan listrik didefinisikan sama dengan arah gaya pada muatan uji. Jika muatan ujinya negatif, kemanakah arah medan listrik di sekitar muatan listrik positif? Ke mana pula arah medan listrik di sekitar muatan negatif? Tuliskanlah alasannya.

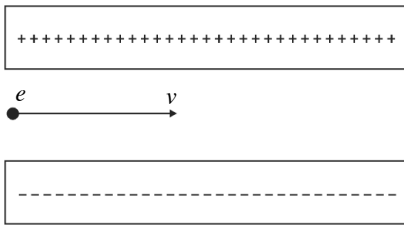
4. Sebuah muatan titik q diikat oleh seutas tali ringan tak bermassa dan digantung. Posisi muatan menjadi seperti pada gambar akibat adanya medan listrik seragam E . Massa muatan m dan percepatan gravitasi g .



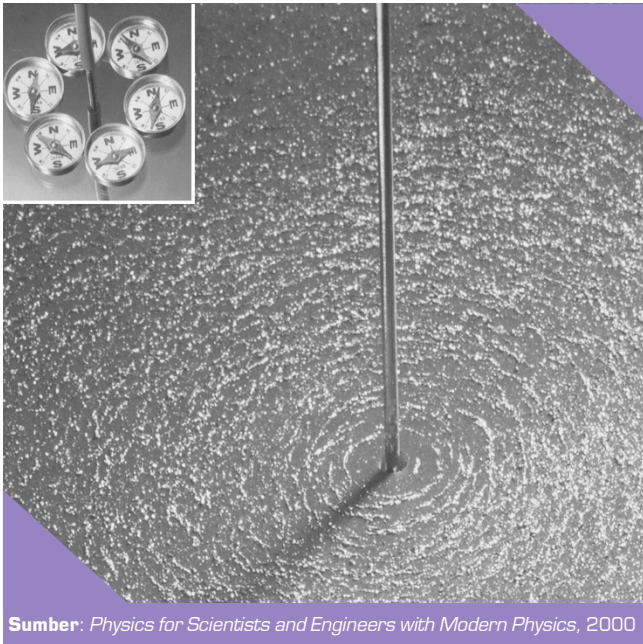
- a. Apakah jenis muatan q ?
- b. Nyatakan E dalam kaitannya dengan q , m , g , dan θ .
- c. Jika $|q| = 1,0 \mu\text{C}$, $m = 20 \text{ g}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\theta = 45^\circ$, berapakah besar E ?

5. Jika dua buah titik, A dan B, memiliki beda potensial sama, apakah ini berarti tidak diperlukan usaha dan gaya untuk memindahkan sebuah muatan dari titik A ke titik B?

6. Sebuah elektron ($m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) ditembakkan dengan kecepatan 10^6 m/s di antara dua keping sejajar seperti tampak pada gambar. Jarak antara kedua keping 5 cm dan diberi beda potensial 50 volt. Abaikan pengaruh gravitasi.



- a. Tentukan besar dan arah gaya pada elektron.
 - b. Tentukan pula besar percepatannya.
 - c. Dihitung dari tepi keping tempat masuk elektron, pada jarak berapa elektron menumbuk keping? Elektron memasuki ruang antara dua keping tepat di tengah-tengahnya.
7. Jika potensial listrik di suatu titik nol, apakah medan listrik di titik tersebut juga nol? Berikan contohnya.
8. Tiga buah muatan titik masing-masing $+2\text{ C}$, -2 C , dan $+2\text{ C}$ diletakkan pada titik-titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan panjang sisi 50 cm .
 - a. Tentukan potensial listrik di titik pusat segitiga.
 - b. Jika muatan $+1\text{ C}$ diletakkan di titik pusat segitiga tersebut, berapa pertambahan energi potensial muatan tersebut?
 9. Apa saja hal yang dapat Anda lakukan untuk memperbesar kapasitas kapasitor?
 10. Tiga buah kapasitor terbuat dari kertas dengan kapasitas berturut-turut $0,15\text{ }\mu\text{F}$, $0,2\text{ }\mu\text{F}$, dan $0,4\text{ }\mu\text{F}$ disusun paralel dan dihubungkan dengan baterai 200 V . Tentukan:
 - a. kapasitansi total,
 - b. muatan pada setiap kapasitor,
 - c. beda potensial setiap kapasitor, dan
 - d. energi yang tersimpan dalam sistem.



Sumber: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000

4

B a b 4

Induksi Magnet

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi dengan cara menerapkan induksi magnetik dan gaya magnet pada beberapa produk teknologi.

Dalam kehidupan sehari-hari, disadari atau tidak, Anda sering menggunakan alat-alat yang memanfaatkan magnet. Misalnya, magnet dapat menjaga agar pintu lemari atau kulkas tetap tertutup. Selain itu, ada pula alat-alat yang memanfaatkan sifat magnet, namun wujud magnetnya sendiri tidak terlihat, seperti bel pintu, telepon, dan motor listrik pada bor.

Tahukah Anda bahwa listrik dan magnet merupakan dua hal berbeda yang memiliki suatu hubungan tertentu? Untuk membuktikannya, letakkanlah sebuah kompas atau secarik kertas yang berisi serbuk besi di dekat kawat berarus listrik. Apakah yang terjadi? Kawat berarus akan menyebabkan jarum kompas bergerak menyimpang dari arah normal utara selatan magnet Bumi, sedangkan serbuk besi akan membentuk suatu pola tertentu. Mengapa demikian?

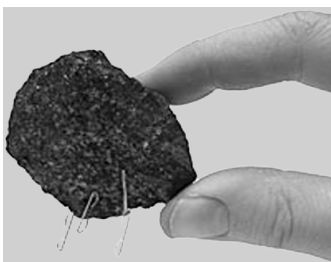
Penelitian mengenai hubungan arus listrik dan magnet sudah dilakukan sejak 1820 oleh Hans Christian Oersted dari Denmark. Dalam bab ini, Anda akan mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan medan magnet yang ditimbulkan oleh aliran arus listrik.

- A. Medan Magnet**
- B. Gaya Magnet**
- C. Lintasan Partikel Bermuatan dalam Medan Magnet Seragam**
- D. Momen Gaya Magnet dan Motor Listrik**

Soal Pramateri

1. Apakah yang Anda ketahui tentang magnet?
2. Jika Anda memiliki sebuah besi, apa saja yang dapat Anda lakukan agar besi tersebut memiliki sifat magnet? Jelaskan.
3. Menurut pengetahuan Anda, apakah arus listrik memiliki hubungan dengan gejala kemagnetan? Jelaskan.

Jelajah Fisika



Pada jaman dahulu, orang-orang tahu bahwa batu magnetis akan selalu menunjuk ke arah yang sama jika digantungkan dengan seutas tali. Hal ini bermanfaat bagi para pengembara untuk menentukan arah. Batu karang tersebut dinamakan *lodestone* yang berarti batu arah.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Gambar 4.1

- (a) Arah garis-garis medan magnet di sekitar magnet batang.
- (b) Garis-garis medan magnet yang diperlihatkan oleh serbuk besi.

Hubungan kelistrikan dan kemagnetan secara kualitatif telah Anda pelajari di SMP. Dalam kehidupan sehari-hari, Anda tentu mengenal beberapa peralatan yang berkaitan dengan gejala kelistrikan dan kemagnetan, seperti generator listrik, telepon, *relay*, transformator, dan motor listrik. Pada bab ini, Anda akan mempelajari lebih dalam lagi tentang gejala kemagnetan, baik secara kualitatif maupun kuantitatif, terutama yang dihasilkan oleh arus listrik.

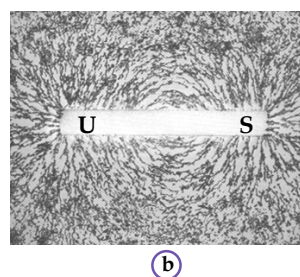
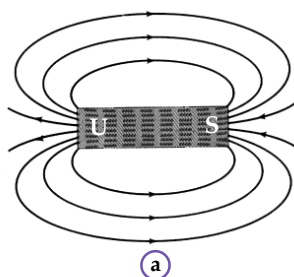
A Medan Magnet

Kemagnetan, seperti halnya kelistrikan, tidak dapat dilihat, tetapi efeknya dapat dilihat dan dirasakan. Magnet dapat menarik beberapa logam, seperti besi dan baja. Zat yang mengandung besi, seperti serbuk besi, akan tertarik pada magnet batang dan berjajar untuk menunjukkan arah garis gaya dari medan magnet tersebut.

Bahan yang dapat ditarik oleh magnet dapat dijadikan magnet. Jika Anda meletakkan sebuah paku baja dekat magnet, paku baja tersebut akan menjadi magnet dan tetap mengandung magnet meskipun Anda sudah menjauhkan magnet asalnya. Hal yang sama terjadi pada paku besi, namun paku besi akan cepat kehilangan sifat magnetnya apabila magnet sudah dijauhkan. Bahan yang mampu menyimpan sifat magnet secara permanen disebut *magnet tetap* (magnet permanen), sedangkan bahan yang menyimpan sementara sifat magnet disebut *magnet sementara*.

Sebuah magnet tetap umumnya terbuat dari baja, logam campuran khusus, atau bahan yang disebut ferit. Magnet memiliki dua ujung yang disebut kutub yang efek magnetisnya sangat kuat, yakni kutub U (utara) dan S (selatan). Kutub sejenis dari dua magnet berbeda akan saling menolak, sedangkan kutub tak sejenis akan saling menarik.

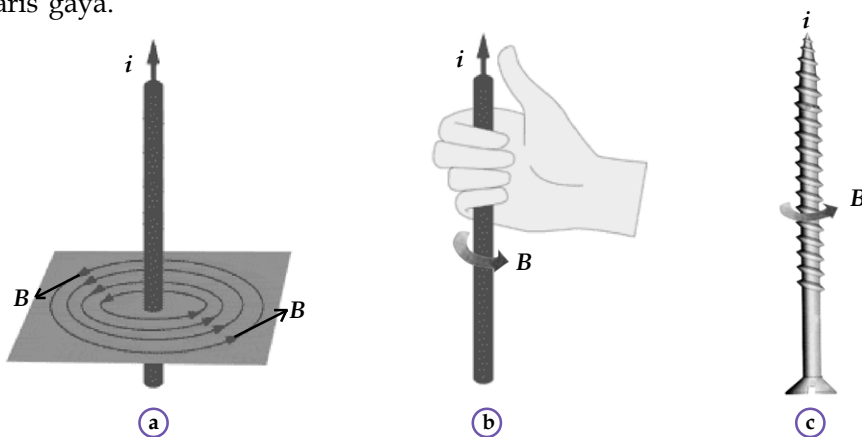
Di sekitar magnet selalu ada *medan magnet*. Medan magnet adalah ruang di sekitar magnet yang masih dirasakan adanya gaya magnet. Medan magnet dapat digambarkan oleh garis-garis medan magnet, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.1**. Di sekitar magnet tetap, arah garis-garis medan selalu keluar dari kutub utara dan masuk ke kutub selatan magnet. Arah medan magnet pada suatu titik didefinisikan sama dengan kutub utara jarum kompas ketika kompas ditempatkan di titik tersebut dan selalu menyinggung garis medan di titik itu.



1. Medan Magnet oleh Arus Listrik

Hubungan kelistrikan dan kemagnetan kali pertama ditemukan oleh **Hans Christian Oersted** (1777–1851). Oersted menemukan bahwa ketika kompas diletakkan dekat dengan kawat penghantar, jarum kompas segera menyimpang dari arah semula saat kawat dihubungkan dengan baterai dan arus listrik mengalir. Seperti telah Anda ketahui, jarum kompas dapat menyimpang ketika berada dalam medan magnet. Oersted menyimpulkan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet.

Medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik disebut *medan magnet induksi*. Garis-garis gaya magnet oleh arus listrik selalu melingkari kawat, dengan kawat sebagai sumbu lingkaran. Orientasi arah garis-garis gaya magnet mengikuti aturan tangan kanan atau aturan putaran sekrup, seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.2**. Arah medan magnet di suatu titik searah dengan orientasi garis-garis gaya dan selalu menyinggung lingkaran garis-garis gaya.

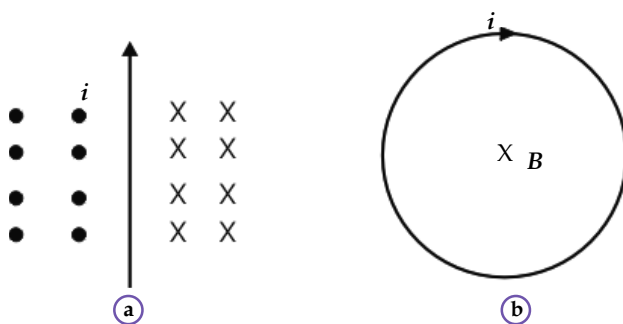


Gambar 4.2

- (a) Garis-garis gaya magnetik di sekitar arus listrik.
- (b) Aturan tangan kanan; jika ibu jari mewakili arah arus (i), jari-jari lainnya mewakili arah medan magnet (B).
- (c) Aturan putaran sekrup: arah putaran sekrup mewakili arah B , arah majunya sekrup mewakili arah i .

Penggunaan aturan tangan kanan bersifat lentur atau fleksibel. Jika arus listrik mengalir pada kawat lurus, ibu jari menunjukkan arah arus (i) dan jari-jari lainnya menunjukkan arah medan magnet (B). Sebaliknya, jika arus listrik mengalir pada kawat melingkar, ibu jari menunjukkan arah B pada sumbu lingkaran dan jari lainnya menunjukkan arah arus i .

Penggambaran arah medan magnetik oleh arus listrik melibatkan gambar tiga dimensi. Oleh karena bidang kertas dua dimensi, cara lain untuk menggambarkan arus atau medan magnetik adalah dengan tanda titik ($\bullet$), yang artinya keluar tegak lurus bidang kertas atau mendekati Anda. Adapun tanda silang ($\times$), artinya masuk tegak lurus bidang kertas atau menjauhi Anda. Sebagai ilustrasi, perhatikan **Gambar 4.3**.

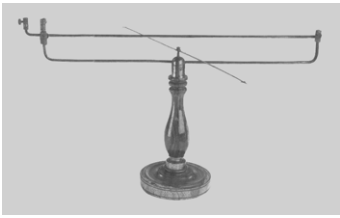


Gambar 4.3

- (a) Arah medan magnet pada bidang kertas di kiri-kanan arus listrik pada kawat lurus.
- (b) Arah medan magnet di sumbu kawat melingkar berarus listrik.

Dengan menggunakan aturan tangan kanan diperoleh medan magnetik di sebelah kanan kawat, pada bidang kertas, arahnya masuk tegak lurus bidang atau menjauhi Anda ($\times$). Di sebelah kiri kawat, pada bidang kertas, arah medan magnetik keluar tegak lurus bidang atau mendekati Anda ($\bullet$). Tanda titik dan silang juga dapat diterapkan untuk arah arus (atau juga gaya) yang masuk bidang dan keluar bidang. Dengan kata lain, tanda titik dan silang dapat digunakan sebagai tanda arah bagi besaran vektor. Tanda titik artinya keluar bidang dan tanda silang artinya masuk bidang. Untuk membuktikan penemuan Oersted, lakukanlah kegiatan **Mahir Meneliti 4.1** berikut.

Jelajah Fisika



Jarum Oersted merupakan alat yang memeragakan penemuan Hans Christian Oersted pada 1820. Apabila arus listrik mengalir di atas dan di bawah jarum kompas, jarum tersebut berayun melintasi kawat. Hal ini menunjukkan bahwa arus listrik menimbulkan efek magnetik.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Jelajah Fisika

Hans Christian Oersted (1777–1851)



Hans Christian Oersted adalah seorang fisikawan dan kimiawan dari Kopenhagen, Denmark. Pada 1820, Oersted menemukan hubungan antara listrik dan magnet, kemudian dipublikasikan pada 21 Juli 1820.

Sumber: www.americanpicture.com

Mahir Meneliti 4.1

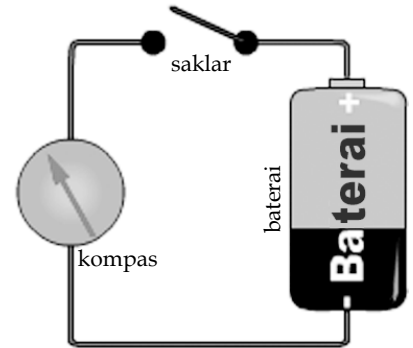
Mengamati Medan Magnet oleh Arus Listrik

Alat dan Bahan

1. Sebuah kompas
2. Kawat tembaga 1 m
3. Sakelar
4. Baterai

Prosedur

1. Siapkan alat dan bahan.
2. Hubungkanlah kedua kutub baterai (+ dan -) dengan sakelar menggunakan kawat tembaga.
3. Ketika sakelar terbuka, letakkanlah kawat tembaga di atas kompas dan sejajar dengan arah jarum kompas.
4. Setelah itu, tutuplah sakelar. Apakah yang terjadi pada jarum kompas?
5. Lakukanlah hal yang sama, tetapi polaritas baterainya dibalikkan. Apakah yang terjadi pada jarum kompas?
6. Lakukan kembali hal yang sama, tetapi jumlah baterai ditambah. Apakah yang terjadi pada jarum kompas?
7. Diskusikan hasil percobaan yang telah dilakukan, kemudian buatlah kesimpulan dari hasil kegiatan tersebut.



Contoh 4.1

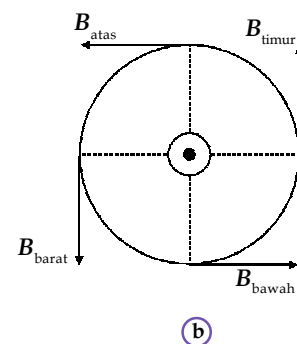
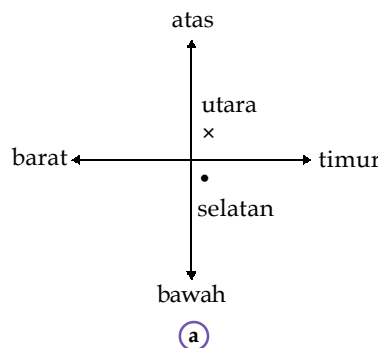
Sebuah kawat lurus panjang melintang dari utara ke selatan dan dialiri arus menuju ke selatan. Tentukan arah medan magnet pada titik yang tepat berada di:

- a. sebelah barat kawat,
- b. sebelah timur kawat,
- c. sebelah atas kawat, dan
- d. sebelah bawah kawat.

Jawab

Arah mata angin didefinisikan seperti pada **Gambar (a)**. Arah arus i ke selatan, dinyatakan oleh tanda titik (ke selatan). Dengan menerapkan aturan tangan kanan, diperoleh arah garis-garis gaya magnet di sekitar arus melingkari kawat dengan arah orientasi berlawanan arah putaran jarum jam, seperti diperlihatkan pada **Gambar (b)**. Dengan acuan arah mata angin pada **Gambar (a)**, dari **Gambar (b)** diperoleh bahwa

- a. di sebelah barat kawat, arah medan magnetiknya ke bawah,
- b. di sebelah timur kawat, arah medan magnetiknya ke atas,
- c. di sebelah atas kawat, arah medan magnetiknya ke barat, dan
- d. di sebelah bawah kawat, arah medan magnetiknya ke timur.



2. Medan Magnet oleh Arus Listrik pada Kawat Lurus Panjang

Sekarang, Anda akan menentukan besar kuat medan magnet di sekitar kawat berarus listrik. Untuk itu, tinjaulah kawat lurus panjang berarus listrik i seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.4**. Besar medan magnet induksi pada suatu titik yang berjarak a dari kawat dinyatakan oleh

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} \quad (3-1)$$

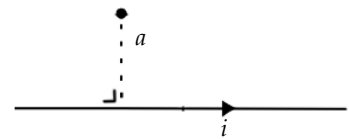
dengan: B = besar medan magnet (tesla, T),

i = arus listrik (ampere, A),

a = jarak titik ke kawat (m), dan

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$.

Satuan medan magnet dalam SI adalah *tesla* (T). Medan magnet juga dapat dinyatakan dalam satuan *newton per ampere-meter* (N/Am) atau *weber per meterpersegi* (Wb/m²). Hubungan antarsatuan tersebut adalah 1 T = 1 N/Am atau 1 T = 1 Wb/m². Satuan lain untuk medan magnet yang bukan dalam SI adalah *Gauss* (G). Hubungan antara Gauss dan Tesla adalah 1 G = 10⁻⁴ T.



Gambar 4.4

Suatu titik yang berjarak a dari kawat lurus berarus.

Contoh 4.2

Sebuah kawat lurus dialiri arus 2 A.

- Tentukan besar medan magnet pada titik yang berjarak 5 cm.
- Berapakah besar medan magnet pada jarak 10 cm dari kawat?

Jawab

Diketahui: $i = 2 \text{ A}$.

- Medan magnet pada jarak $a = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$ adalah

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(2 \text{ A})}{(2\pi)(5 \times 10^{-2} \text{ m})} = 8 \times 10^{-6} \text{ T}.$$

- Jarak 10 cm merupakan **2 kali** dari jarak 5,0 cm. Oleh karena itu, medan magnet pada jarak 10 cm menjadi $\frac{1}{2}$ kali medan magnet pada jarak 5 cm (medan magnet berbanding terbalik dengan jarak titik ke kawat). Jadi, medan magnet pada jarak 10 cm adalah

$$B = \frac{1}{2} (8 \times 10^{-6} \text{ T}) = 4 \times 10^{-6} \text{ T}.$$

Contoh 4.3

Dua buah kawat lurus dan sejajar masing-masing dialiri arus 2 A dan 4 A yang arahnya sama. Kedua kawat terpisah pada jarak 16 cm.

- Tentukan medan magnet pada titik tengah di antara kedua kawat.
- Di manakah posisi suatu titik terhadap kawat berarus 2 A yang memiliki medan magnet nol?

Jelajah Fisika



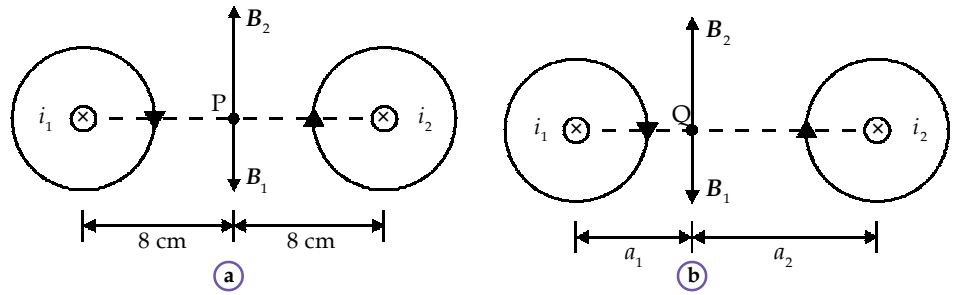
Pada 1825, *William Sturgeon* (1783–1850) menggulung seutas kawat di sekeliling batang besi. Itulah salah satu elektromagnet yang berbeda dengan magnet permanen biasa. Magnetisme elektromagnet dapat dihidupkan dan dimatikan dengan mengatur aliran arus listrik pada kumparan kawat.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997



Jawab

Anggap arus listrik masuk bidang kertas seperti diperlihatkan pada gambar berikut.



- a. Dengan menggunakan aturan tangan kanan, arah medan magnet di tengah-tengah antara dua kawat, sebut titik P, oleh masing-masing arus listrik diperlihatkan pada **Gambar (a)**. Jarak titik P ke kawat pertama sama dengan jarak titik P ke kawat kedua ($a_1 = a_2 = 8 \text{ cm} = 8 \times 10^{-2} \text{ m}$). Besar medan magnet oleh masing-masing kawat adalah

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a_1} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(2\text{A})}{(2\pi)(8 \times 10^{-2} \text{ m})} = 5 \times 10^{-6} \text{ T}$$

dan

$$B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi a_2} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(4\text{A})}{(2\pi)(8 \times 10^{-2} \text{ m})} = 10 \times 10^{-6} \text{ T}$$

Oleh karena B_1 dan B_2 berlawanan arah, resultan medan magnetik di titik P adalah

$$B = B_2 - B_1 = (10 \times 10^{-6} \text{ T}) - (5 \times 10^{-6} \text{ T}) = 5,0 \times 10^{-6} \text{ T}$$

Jadi, arah medan magnetik di titik P sama dengan arah B_2 .

- b. B_1 dan B_2 akan menghasilkan resultan nol jika keduanya berlawanan arah dan besarnya sama. Keadaan tersebut dipenuhi jika letak titiknya, sebut Q, pada jarak a_1 dari kawat pertama sedemikian seperti diperlihatkan pada **Gambar (b)**.

Dari persamaan $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}$, syarat $B_1 = B_2$ diperoleh jika $\frac{i_1}{a_1} = \frac{i_2}{a_2}$, atau

perbandingan jaraknya

$$a_1 : a_2 = i_1 : i_2 = 2 : 4 = 1 : 2$$

Oleh karena jarak antarkawat 16 cm, dengan bantuan Matematika untuk perbandingan diperoleh

$$a_1 = \left(\frac{1}{1+2} \right) (16 \text{ cm}) = 5,3 \text{ cm}$$

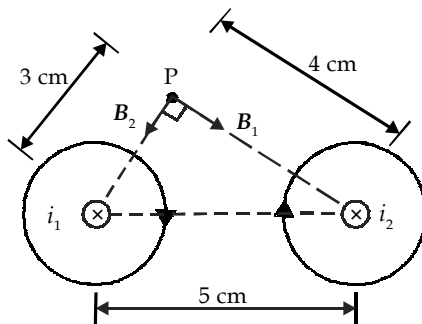
Jadi, letak titik yang kuat medannya nol berada pada jarak 5,3 cm dari kawat pertama ke arah kawat kedua.

Contoh 4.4

Dua buah kawat lurus dan sejajar terpisah pada jarak 5,0 m, masing-masing dialiri arus $i_1 = 0,9 \text{ A}$ dan $i_2 = 1,6 \text{ A}$. Titik P berjarak 3 cm dari kawat pertama dan 4 cm dari kawat kedua. Tentukan medan magnet di titik P.

Jawab

Anggap arus listrik masuk bidang kertas. Dengan menggunakan aturan tangan kanan, arah medan magnet di titik P oleh masing-masing arus diperlihatkan pada gambar berikut.



Besar masing-masing medan magnet adalah

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a_1} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(0,9\text{A})}{(2\pi)(3 \times 10^{-2} \text{ m})} = 6 \times 10^{-6} \text{ T}$$

dan

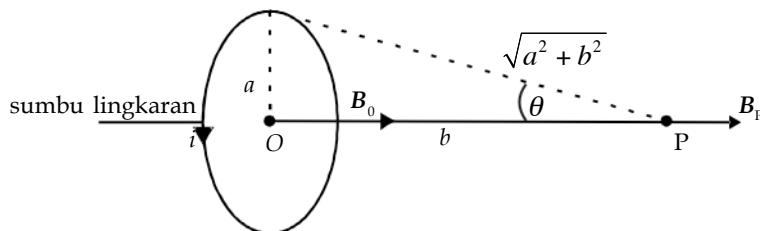
$$B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi a_2} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(1,6\text{A})}{(2\pi)(4 \times 10^{-2} \text{ m})} = 8 \times 10^{-6} \text{ T}$$

Oleh karena B_1 dan B_2 saling tegak lurus, resultan medan magnet di titik P adalah

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{(6 \times 10^{-6} \text{ T})^2 + (8 \times 10^{-6} \text{ T})^2} = 10 \times 10^{-6} \text{ T} = 1 \times 10^{-5} \text{ T}$$

3. Medan Magnet oleh Arus Listrik pada Kawat Melingkar

Tinjau kawat melingkar dengan jari-jari a dan dialiri arus listrik i seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.5**. Dalam hal ini, Anda hanya akan meninjau medan magnet yang dihasilkan arus, tepat di sepanjang sumbu lingkaran kawat. Titik O adalah titik pusat lingkaran dan titik P berada pada sumbu lingkaran yang berjarak b dari titik O. Arah medan magnet di titik O sama dengan di titik P. Arahnya dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan, yaitu ibu jari mewakili arah medan magnet dan arah melingkar jemari lainnya adalah arah arus. Hasilnya seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.5**.



Besar medan magnet di titik O (pusat lingkaran) adalah

$$B_o = \frac{\mu_0 i}{2a} \quad (4-2)$$

Sementara itu, medan magnet di titik P memenuhi

$$B_p = B_o \sin^3 \theta \quad (4-3)$$

dengan θ = sudut yang dibentuk oleh sumbu lingkaran dan garis hubung titik P ke kawat. Dari **Gambar 4.5**, diperoleh

$$\sin \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4-4)$$

Persamaan (4-2) dan **(4-3)** berlaku untuk kawat berarus listrik yang tepat satu lilitan (satu lingkaran). Jika terdapat N lilitan tipis, kuat medan magnet pada persamaan tersebut besarnya dikalikan N .

Kata Kunci

- Arus listrik
- Medan magnet
- Medan magnet induksi
- Magnet sementara
- Magnet tetap

Gambar 4.5

Medan magnet di sumbu kawat melingkar berarus listrik.

Contoh 4.5

Sebuah kawat melingkar dengan jari-jari 2 cm dialiri arus listrik 5 A. Tentukan medan magnet:

- di titik pusat lingkaran dan
- di titik P yang berada pada sumbu dan berjarak 4 cm dari pusat lingkaran.

Jawab

Diketahui: $i = 5$ A, $a = 2$ cm, dan $b = 4$ cm.

- a. Medan magnet di titik pusat lingkaran adalah

$$B_O = \frac{\mu_o i}{2a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(5\text{A})}{(2)(2 \times 10^{-2} \text{ m})} = 5\pi \times 10^{-5} \text{ T}.$$

- c. Dari **Persamaan (4-4)** diperoleh

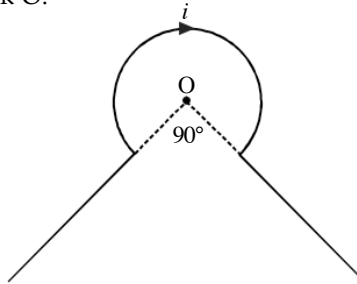
$$\sin \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{2}{\sqrt{(2 \text{ cm})^2 + (4 \text{ cm})^2}} = \frac{2}{\sqrt{20}} = \frac{1}{\sqrt{5}}$$

maka medan magnet di titik P adalah

$$B_P = B_O \sin^3 \theta = (5\pi \times 10^{-5} \text{ T}) \left(\frac{1}{\sqrt{5}} \right)^3 = 2\pi \sqrt{5} \times 10^{-6} \text{ T}.$$

Contoh 4.6

Titik O adalah pusat lingkaran yang diameternya 4 cm seperti terlihat pada gambar berikut. Jika kuat arus yang mengalir pada kawat adalah 40 A, tentukan besar medan magnet di titik O.



Jawab

Perhatikan bahwa jumlah lilitannya bukan 1 lilitan (1 lingkaran), tetapi $\frac{3}{4}$ lingkaran, diperoleh dari

$$N = \frac{270^\circ}{360^\circ} = \frac{3}{4} \text{ lilitan}.$$

Besar medan magnet di titik O yang dihasilkan kawat $\frac{3}{4}$ lilitan adalah

$$B = \frac{3}{4} \frac{\mu_o i}{2a} = \frac{3}{4} \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(40\text{A})}{(2)(2 \times 10^{-2} \text{ m})} = 3\pi \times 10^{-4} \text{ T}.$$

4. Medan Magnet oleh Arus Listrik pada Solenoida dan Toroida

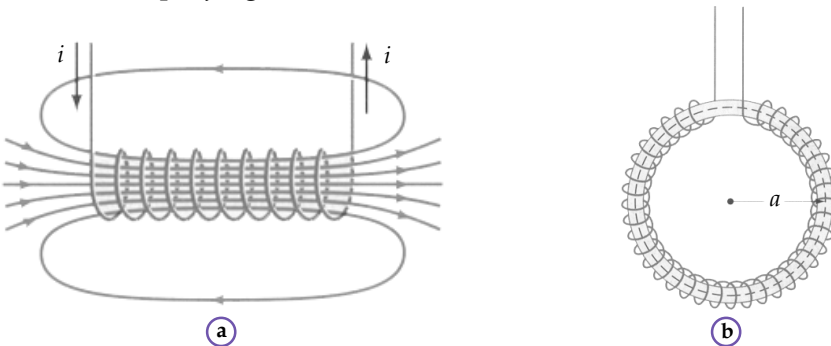
Solenoida adalah kumparan kawat yang terdiri atas banyak lilitan, seperti terlihat pada **Gambar 4.6(a)**. Medan magnet di dalam solenoida merupakan resultan medan magnet yang dihasilkan oleh setiap lilitan. Besar medan magnet di tengah-tengah solenoida memenuhi persamaan

$$B_o = \frac{\mu_o iN}{L} \quad (4-5)$$

sedangkan di ujung solenoida

$$B_u = \frac{1}{2} B_o \quad (4-6)$$

dengan: B_o = medan magnet di tengah-tengah solenoida (T),
 B_u = medan magnet di ujung solenoida (T),
 N = jumlah lilitan solenoida (m), dan
 L = panjang solenoida.



Kata Kunci

- Elektromagnet
- Solenoida
- Toroida

Gambar 4.6

Medan magnet oleh arus listrik pada:
(a) solenoida, dan
(b) toroida.

Toroida adalah solenoida yang melingkar, seperti terlihat pada **Gambar 4.6 (b)**. Medan magnetik di dalam sumbu lilitan toroida memenuhi persamaan

$$B = \frac{\mu_o iN}{2\pi a} \quad (4-7)$$

dengan a = jari-jari toroida (m).

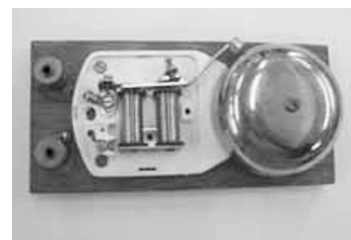
Medan magnet yang dihasilkan solenoida cukup besar. Solenoida bertindak seperti sebuah magnet. Jika ke dalam solenoida dimasukkan inti besi, medan magnetnya akan menjadi lebih besar. Solenoida dengan inti besi di dalamnya disebut *elektromagnet*. Setiap ujung elektromagnet akan menjadi kutub U dan kutub S. Dengan menggunakan aturan tangan kanan dan mengingat bahwa garis gaya magnet selalu keluar dari kutub U dan masuk ke kutub S, kutub-kutub magnet solenoida dapat ditentukan. Elektromagnet banyak digunakan dalam peralatan elektrik, misalnya bel listrik, relay, telepon, dan telegraf.

Contoh 4.7

Solenoida yang terdiri atas 10 lilitan tiap cm dialiri arus listrik 8 A. Tentukan medan magnet:

- di tengah-tengah solenoida, dan
- di ujung solenoida.

Jelajah Fisika



Jika arus listrik dihidupkan, elektromagnet akan menarik potongan besi di dekatnya. Gerakan besi ini disebut armatur dan dapat digunakan untuk menghidupkan sirkuit listrik terpisah. Pada bel listrik ini, armatur juga mematikan sirkuitnya sendiri.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Loncatan Kuantum



Sumber: www.bbc.co.uk

Kereta api maglev (*magnetic levitation*) memiliki elektromagnet di bagian bawahnya. Kereta tersebut bergerak di atas rel dengan menggunakan elektromagnet yang terdapat di antara keduanya. Kedua magnet saling menolak sehingga kereta sedikit melayang di atas rel. Keadaan tersebut dapat mengurangi jumlah gesekan antara kereta dan rel sehingga kereta hanya membutuhkan sedikit energi untuk bergerak.

Quantum Leap

Maglev (Magnetic levitation) trains have electromagnets on the bottom. They run on tracks with electromagnets on them. The magnet repel each other, so the train hovers just above the track. This reduces the amount of friction between the train and the track, so the train needs less energy to make it move.

Sumber: *Science Encyclopedia*, 2000

Jawab

Diketahui: $\frac{N}{L} = 10 \text{ lilitan/cm} = 1.000 \text{ lilitan/m}$ dan $i = 8 \text{ A}$.

a. Medan magnet di tengah-tengah solenoida adalah

$$B_o = \frac{\mu_o i N}{L} = \mu_o i \left(\frac{N}{L} \right) = (4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A m})(8 \text{ A})(1.000) = 3,2\pi \times 10^{-3} \text{ T}.$$

b. Medan magnet di ujung solenoida adalah

$$B = \frac{1}{2} B_o = \frac{1}{2} (3,2\pi \times 10^{-3} \text{ T}) = 1,6\pi \times 10^{-3} \text{ T}.$$

Contoh 4.8

Toroida dengan 100 lilitan dan jari-jari 10 cm dialiri arus 3 A. Tentukan besar medan magnet di dalam sumbu lilitan toroida.

Jawab

Diketahui: $N = 100$, $a = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$, dan $i = 3 \text{ A}$.

Medan magnet di dalam sumbu belitan toroida adalah

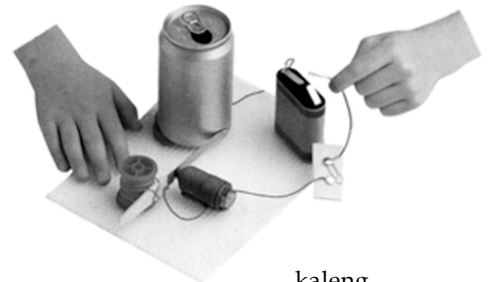
$$B = \frac{\mu_o i N}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A m})(3 \text{ A})(100)}{(2\pi)(0,1 \text{ m})} = 6 \times 10^{-4} \text{ T}.$$

Mahir Meneliti 4.2

Membuat Alarm Sederhana dengan Memanfaatkan Elektromagnet

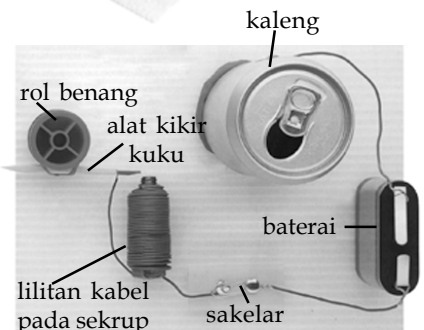
Alat dan Bahan

1. Sekrup besi/baja berukuran besar
2. Kabel ($\pm 3 \text{ m}$)
3. Baterai 4,5 V
4. Kaleng bekas minumam ringan
5. Alat kikir kuku dari baja (*Steel nail file*)
6. Paku payung dan *paper clips*
7. Plastisin
8. Rol benang



Prosedur

1. Lilitkan kabel pada sekrup. Buatlah sakelar sederhana dari *paper clips* dan dua buah paku payung. Kemudian, pasanglah alat kikir kuku pada rol benang, seperti pada gambar.
2. Kuatkan bagian bawah kaleng, rol benang, kumparan kabel, dan sakelar menggunakan plastisin dengan posisi seperti pada gambar.
3. Hubungkan kabel dari kumparan ke alat kikir dan sakelar, sedangkan kutub-kutub baterai dihubungkan ke sakelar dan kaleng.
4. Aktifkan sakelar, kemudian amati yang terjadi pada alat kikir dan kaleng. Mengapa demikian?
5. Diskusikan hasil percobaan yang telah dilakukan, kemudian buatlah kesimpulan dari hasil kegiatan tersebut.



Soal Penguasaan Materi 4.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Sebuah kawat melingkar berada di atas bidang datar. Jika arus listrik pada kawat searah putaran jarum jam, ke mana arah medan magnetik di sumbu lingkaran kawat?
2. Sebuah kawat lurus panjang melintang dari timur ke barat dan dialiri arus listrik 5 A menuju ke barat. Tentukan besar dan arah medan magnetik pada titik P yang berjarak 2,5 cm dari kawat, jika titik P.
 - a. tepat di atas kawat,
 - b. tepat di bawah kawat,
 - c. tepat di utara kawat, dan
 - d. tepat di selatan kawat.
3. Sebuah kawat melingkar berjari-jari 5 cm dialiri arus listrik 20 A. Tentukan besar medan magnetik
 - a. di pusat lingkaran dan
 - b. di titik P, pada sumbu lingkaran yang berjarak 12 cm dari pusat kawat.
4. Medan magnet di tengah-tengah solenoida sama dengan medan magnet di dalam sumbu belitan toroida ketika keduanya dialiri arus listrik yang sama. Panjang solenoida 62,8 cm dan jari-jari toroida 5 cm. Jika toroida memiliki 40 lilitan, berapakah jumlah lilitan solenoida?

B Gaya Magnet

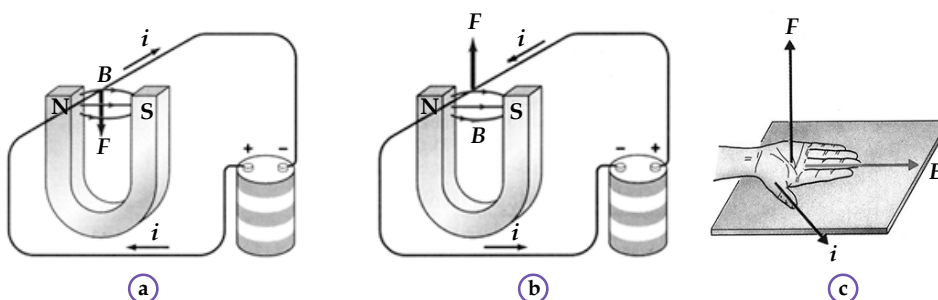
1. Gaya Magnet pada Kawat Berarus Listrik di dalam Medan Magnet

Selain menunjukkan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet, menyimpangnya jarum kompas saat berada dekat kawat berarus listrik juga menunjukkan bahwa arus listrik telah mengerahkan gaya pada sebuah magnet (jarum kompas). Pertanyaannya adalah dapatkah magnet mengerahkan gaya pada kawat berarus listrik? Hukum Ketiga Newton (Hukum Aksi-Reaksi) memungkinkan peristiwa itu terjadi. Hasil eksperimen Oersted menunjukkan bahwa kawat berarus listrik mengalami gaya ketika berada di dalam medan magnet yang dihasilkan sebuah magnet tetap.

Untuk mengetahui proses terjadinya gaya magnet pada kawat berarus listrik, perhatikan **Gambar 4.7**. Sebuah kawat lurus diletakkan di antara dua kutub magnet. Ketika kawat dihubungkan dengan baterai, arus listrik segera mengalir pada kawat dan ternyata kawat bergerak ke bawah (**Gambar 4.7(a)**). Ketika arah arus pada kawat di balik, gaya pada kawat ke atas (**Gambar 4.7(b)**). Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa arah gaya pada kawat tidak menuju ke salah satu kutub magnet, tetapi selalu tegak lurus terhadap medan magnet dan juga tegak lurus arah arus pada kawat. Arah gaya magnet dapat ditentukan menggunakan aturan tangan kanan, seperti pada **Gambar 4.7(c)**. Ibu jari menunjukkan arah arus i , empat jari lainnya menunjukkan arah medan magnet B , dan telapak tangan menunjukkan arah gaya magnet F .

Kata Kunci

- Aturan tangan kanan
- Gaya magnet



Gambar 4.7

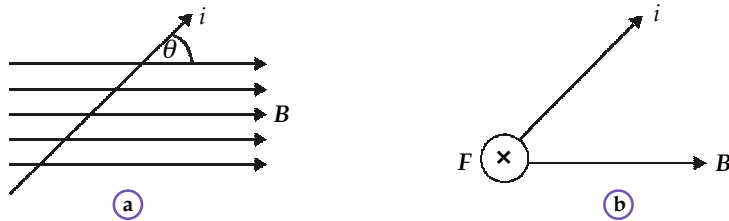
Gaya magnet pada kawat berarus listrik di dalam medan magnet mengarah (a) ke bawah, (b) ke atas, dan (c) ditentukan oleh aturan tangan kanan.



Besar gaya magnet pada kawat berarus listrik sebanding dengan medan magnet, kuat arus listrik pada kawat, dan panjang kawat. Besar gaya magnet juga bergantung pada sudut antara arah arus pada kawat dan arah medan magnet (**Gambar 4.8**).

Gambar 4.8

- (a) Kawat berarus listrik dalam medan magnet.
(b) Arah gaya masuk bidang gambar.



Ketika arah arus tegak lurus medan magnet ($\theta = 90^\circ$), gaya magnet pada kawat maksimum. Ketika arah arus searah atau berlawanan arah medan magnet ($\theta = 0^\circ$ atau $\theta = 180^\circ$), kawat tidak mengalami gaya. Pada sudut lainnya, gaya magnet sebanding dengan $\sin \theta$. Secara matematis, gaya magnet ditulis

$$F = Bil \sin \theta \quad (4-8)$$

dengan: F = gaya magnet (N),

l = panjang kawat yang berada dalam medan magnet (m), dan

θ = sudut antara arah arus pada kawat dan medan magnet.

Contoh 4.9

Sebuah kawat lurus sepanjang 25 cm berada dalam medan magnet 0,10 T, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.8(a)**. Kawat dialiri arus listrik 10 A. Tentukan besar dan arah gaya yang dialami kawat.

Jawab

Diketahui: $l = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$, $B = 0,15 \text{ T}$, $i = 10 \text{ A}$, dan $\theta = 30^\circ$.

Besar gaya yang dialami kawat adalah

$$F = Bil \sin \theta = (0,1 \text{ T})(10 \text{ A})(0,25 \text{ m})(0,5) = 0,125 \text{ N}.$$

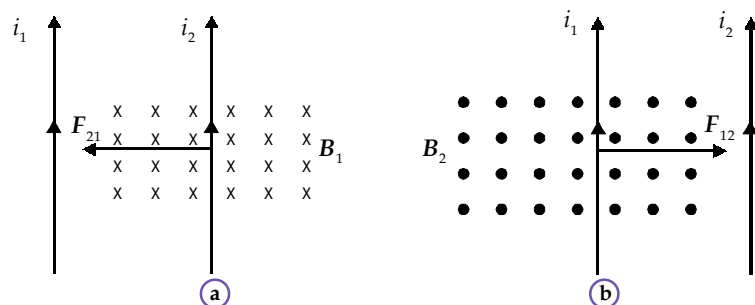
Seperti pada **Gambar 4.8(b)**, arahnya masuk bidang gambar.

2. Gaya Magnet Antarkawat Berarus Listrik

Telah Anda ketahui bahwa di sekitar arus listrik terdapat medan magnet. Jika ada kawat berarus listrik dalam medan magnet, kawat dapat mengalami gaya magnet. Dengan demikian, jika ada dua kawat berarus listrik, antarkawat dapat terjadi gaya interaksi. Untuk memahami proses terjadinya gaya interaksi antarkawat berarus listrik tersebut, tinjaulah **Gambar 4.9**.

Gambar 4.9

- Gaya interaksi antarkawat berarus listrik.
(a) Gaya pada kawat i_2 .
(b) Gaya pada kawat i_1 .



Gambar 4.9(a) memperlihatkan dua buah kawat lurus sejajar, terpisah pada jarak a , berarus i_1 dan i_2 dengan arah yang sama. Bayangkan pada awalnya hanya ada kawat i_1 dengan medan magnet yang dihasilkannya B_1 . Sesuai aturan

tangan kanan, arah medan magnet di sebelah kanan kawat adalah masuk bidang gambar ($\times$). Selanjutnya, simpan kawat berarus listrik i_2 dalam medan magnet B_1 . Kawat i_2 akan mendapat gaya magnet (F_{21}), dengan arah menuju kawat i_1 seperti pada **Gambar 4.9(a)** (gunakan aturan tangan kanan untuk menentukan gaya). Besar gaya yang dialami kawat i_2 adalah

$$F_{21} = B_1 i_2 l = \left(\frac{\mu_0 i_1}{2\pi a} \right) i_2 l = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi a} \quad (4-9)$$

Hal serupa terjadi ketika Anda bayangkan sebaliknya (**Gambar 4.9(b)**). Awalnya, hanya ada kawat i_2 dengan medan magnet B_2 . Kawat i_1 berada dalam medan magnet B_2 yang dihasilkan kawat i_2 . Dengan aturan tangan kanan, gaya pada kawat i_1 (F_{12}) menuju kawat i_2 . Besar gaya ini adalah

$$F_{12} = B_2 i_1 l = \left(\frac{\mu_0 i_2}{2\pi a} \right) i_1 l = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi a} \quad (4-10)$$

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa antarkawat berarus listrik, dengan arah sama, terjadi gaya tarik-menarik. Dari **Persamaan (4-9)** dan **(4-10)** diperoleh bahwa gaya-gaya tersebut, F_{12} dan F_{21} , merupakan pasangan gaya aksi-reaksi. Jika dinyatakan dalam N/m, gaya per satuan panjang, diperoleh

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a} \quad (4-11)$$

Jika arah arus pada kawat berlawanan, kedua kawat akan saling menolak.

Contoh 4.10

Dua buah kawat lurus sejajar terpisah pada jarak 8 cm. Kedua kawat dialiri arus masing-masing 2,5 A dan 4 A dengan arah sama. Tentukan gaya tarik-menarik antarkawat per satuan panjang.

Jawab

Diketahui: $a = 8 \text{ cm} = 8 \times 10^{-2} \text{ m}$, $i_1 = 2,5 \text{ A}$, dan $i_2 = 4 \text{ A}$.
Gaya antarkawat per satuan panjang adalah

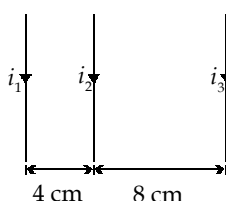
$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A m})(2,5 \text{ A})(4 \text{ A})}{(2\pi)(8 \times 10^{-2} \text{ m})} = 2,5 \times 10^{-5} \text{ N/m}$$

Contoh 4.11

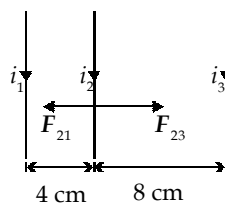
Tiga kawat lurus sejajar dengan arus masing-masing 4 A dan arahnya sama seperti diperlihatkan pada gambar berikut. Tentukan gaya per satuan panjang yang dialami kawat i_2 .

Jawab

Gaya pada kawat i_2 oleh kawat i_1 (F_{21}) dan oleh kawat i_3 (F_{23}), diperlihatkan pada gambar berikut.



(a)



(b)

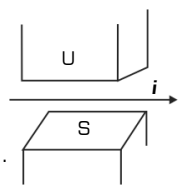
Solusi

Cerdas

Sepotong kawat berarus listrik berada di dalam medan magnet homogen seperti pada gambar di samping.

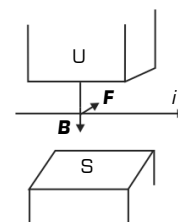
Kawat tersebut akan mengalami gaya magnet yang arahnya ...

- menembus kertas mendekati pembaca
- menembus kertas menjauhi pembaca
- ke atas
- ke bawah
- ke segala arah



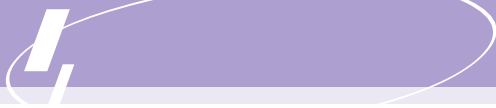
Penyelesaian

Dengan menggunakan aturan tangan kanan, diperoleh bahwa gaya menembus kertas menjauhi pembaca.



Jawab: b

UN 2004/2005



Besar masing-masing gaya tersebut adalah

$$\frac{F_{21}}{l} = \frac{\mu_0 i_2 i_1}{2\pi a_{21}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(4\text{A})(4\text{A})}{(2\pi)(4 \times 10^{-2} \text{ m})} = 8 \times 10^{-5} \text{ N/m}$$

$$\frac{F_{23}}{l} = \frac{\mu_0 i_2 i_3}{2\pi a_{23}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(4\text{A})(4\text{A})}{(2\pi)(8 \times 10^{-2} \text{ m})} = 4 \times 10^{-5} \text{ N/m}$$

Oleh karena F_{21} dan F_{23} berlawanan arah, resultan gaya pada i_2 adalah

$$\frac{F}{l} = \frac{F_{21} - F_{23}}{l} = (8 \times 10^{-5} \text{ N/m}) - (4 \times 10^{-5} \text{ N/m}) = 4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Arahnya menuju kawat i_1 .

3. Gaya Magnet pada Muatan yang Bergerak di dalam Medan Magnet

Gaya pada kawat berarus listrik dapat dipandang sebagai gaya total pada setiap muatan. Pandangan ini didasari oleh definisi bahwa arus listrik adalah laju aliran muatan-muatan listrik. Misalnya, N partikel bermuatan q mengalir melintasi penampang kawat dengan kecepatan v . Dalam selang waktu t , arus listriknya adalah

$$i = \frac{Nq}{t}$$

dan jarak yang ditempuh muatan adalah

$$l = vt$$

Dengan demikian, gaya pada N partikel adalah

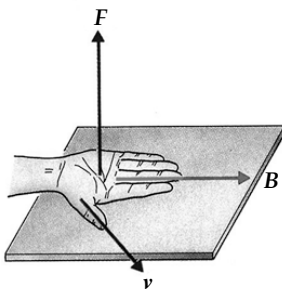
$$F = Bil \sin \theta = B \left(\frac{Nq}{t} \right) (vt) \sin \theta = NBqv \sin \theta$$

Gaya pada sebuah muatan adalah gaya total pada N muatan dibagi N , yaitu

$$F = Bqv \sin \theta \quad (4-12)$$

dengan θ = sudut antara kecepatan dan medan magnet.

Arah gaya magnet pada muatan ditentukan dengan aturan tangan kanan seperti terlihat pada **Gambar 4.10**. Dalam hal ini, untuk muatan positif, ibu jari mewakili arah kecepatan v , sedangkan untuk muatan negatif, ibu jari mewakili kebalikan dari arah kecepatan v . **Gambar 4.10** memperlihatkan arah gaya pada muatan akibat medan magnet. Perhatikan bahwa F selalu tegak lurus v dan B .

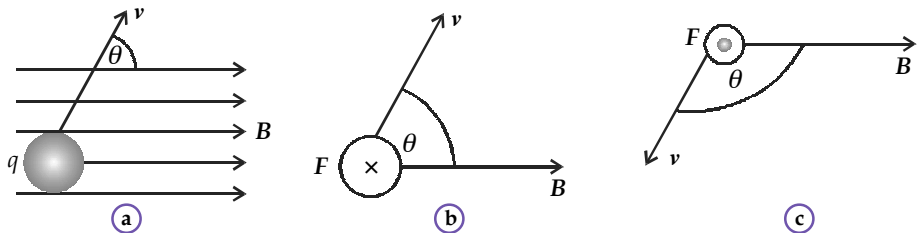


Gambar 4.10

Aturan tangan kanan untuk muatan yang bergerak di dalam medan magnet.

Gambar 4.11

- (a) Muatan bergerak dalam medan magnet dapat mengalami gaya.
- (b) Arah gaya pada muatan positif.
- (c) Arah gaya pada muatan negatif.



Contoh 4.12

Muatan listrik $5 \mu\text{C}$ bergerak dalam medan magnet sebesar $0,25 \text{ T}$ dengan kecepatan 10^5 m/s . Jika arah kecepatan membentuk sudut 30° terhadap arah medan magnet, tentukan besar gaya yang dialami muatan tersebut.

Jawab

Diketahui: $q = 5 \mu\text{C} = 5 \times 10^{-6} \text{C}$, $B = 0,25 \text{T}$, $v = 10^5 \text{m/s}$, dan $\theta = 30^\circ$.

Gaya pada muatan tersebut adalah

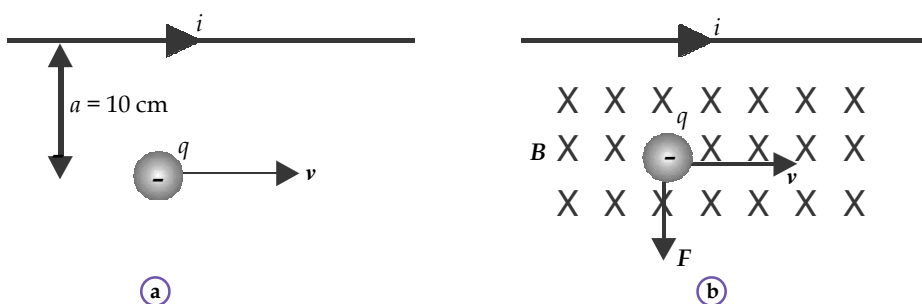
$$F = Bqv \sin \theta = (0,25 \text{T})(5 \times 10^{-6} \text{C})(10^5 \text{m/s})(0,5) = 6,25 \times 10^{-2} \text{N}.$$

Contoh 4.13

Sebuah elektron ditembakkan dengan kecepatan $5 \times 10^6 \text{m/s}$ searah arus pada kawat lurus panjang berarus listrik 20A . Jarak antara elektron dan kawat adalah 10cm . Tentukanlah besar dan arah gaya mula-mula yang bekerja pada elektron.

Jawab

Di sekitar arus listrik terdapat medan magnet. Oleh karena itu, ketika partikel bermuatan listrik bergerak di daerah sekitar arus listrik, partikel tersebut dapat mengalami gaya dengan syarat arah geraknya tidak sejajar medan magnet. Misalnya, arah arus dan arah gerak elektron serta posisi elektron seperti diilustrasikan pada **Gambar (a)**.



Dengan menggunakan aturan tangan kanan, arah medan magnet di daerah bawah kawat yang dihasilkan arus listrik adalah masuk bidang kertas ($\times$). Selanjutnya, arah gaya magnet pada elektron ditentukan dengan menggunakan aturan tangan kanan untuk gaya pada muatan negatif. Hasilnya adalah arah gaya magnet pada elektron menjauhi tegak lurus kawat. Besar medan magnet di sekitar arus listrik pada kawat lurus panjang adalah

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{Wb/Am})(20 \text{A})}{(2\pi)(10 \times 10^{-2} \text{m})} = 10^{-5} \text{T}$$

Selanjutnya, dari **Gambar (b)** terlihat bahwa sudut antara v dan F adalah $\theta = 90^\circ$. Dengan demikian, besar gaya pada elektron (ingat, muatan elektron $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$) adalah

$$F = Bqv \sin \theta = (10^{-5} \text{T})(1,6 \times 10^{-19} \text{C})(5 \times 10^6 \text{m/s})(1) = 8 \times 10^{-18} \text{N}.$$

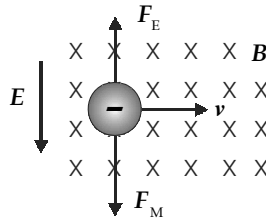
Jadi, gaya pada elektron adalah $8 \times 10^{-18} \text{N}$ menjauhi kawat.

Contoh 4.14

Sebuah elektron ditembakkan dengan kecepatan $4 \times 10^5 \text{m/s}$ melalui ruang bermedan listrik dan bermedan magnet yang saling tegak lurus dan tegak lurus pula dengan arah gerak elektron. Jika besar medan magnet $0,6 \text{tesla}$, tentukan besar medan listrik sehingga elektron tetap bergerak lurus.

Jawab

Ilustrasi untuk Contoh Soal 4.14 ditunjukkan pada gambar berikut.



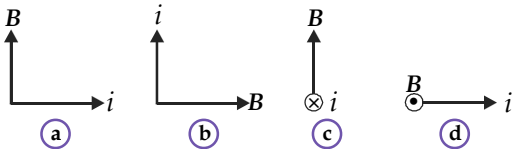
Elektron mengalami dua gaya, yakni gaya elektrostatis ($F_E = qE$), dan gaya magnet ($F_M = Bqv$) dengan arah saling berlawanan. Agar elektron tetap bergerak lurus, resultan gaya yang bekerja padanya harus sama dengan nol (ingat Hukum Pertama Newton). Ini akan dipenuhi jika $F_E = F_M$ atau $qE = Bqv$ sehingga diperoleh hubungan $E = Bv$.

Diketahui $v = 4 \times 10^5$ m/s dan $B = 0,6$ T maka besar medan listriknya $E = Bv = (0,6)(4 \times 10^5$ V/m.

Soal Penguasaan Materi 4.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Gambarkan arah gaya magnet (F) pada kawat berarus listrik yang berada dalam medan magnet dengan arah i dan B seperti diperlihatkan pada gambar berikut.



2. Dua buah kawat lurus sejajar terpisah pada jarak 8 cm dan dialiri arus masing-masing 3 A dan 5 A. Arah arus pada kedua kawat berlawanan.

- a. Tentukan besar gaya yang dialami setiap muatan per satuan panjang.
 - b. Ke mana arah gaya pada setiap kawat relatif terhadap kawat lainnya?
3. Sebuah muatan 0,25 C bergerak dalam medan magnet 0,01 T dengan kecepatan 2×10^4 m/s. Tentukan besar gaya yang dialami muatan jika arah gerak muatan:
 - a. sejajar medan magnet,
 - b. tegak lurus medan magnet, dan
 - c. membentuk sudut 45° terhadap medan magnet.

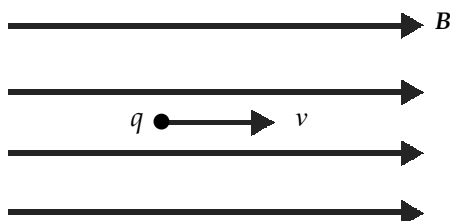
C Lintasan Partikel Bermuatan dalam Medan Magnet Seragam

Terdapat tiga macam lintasan partikel bermuatan listrik dalam medan magnet seragam (serbasama atau homogen), yakni lintasan lurus, melingkar, dan spiral atau heliks. Macam-macam lintasan yang terjadi bergantung pada sudut antara arah gerak (kecepatan) muatan dan medan magnet.

1. Lintasan Lurus

Ketika muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet mendapatkan gaya magnet, sesuai aturan tangan kanan, gaya magnet (F) pasti tegak lurus v dan B . Gaya yang tegak lurus kecepatan atau arah gerak akan menyebabkan

gerak partikel membelok. Akan tetapi, apakah muatan yang bergerak dalam medan magnet selalu mendapat gaya magnet? Jawabannya, tidak. Dari persamaan $F = Bqv \sin \theta$, $F = 0$ jika $\sin \theta = 0$, dan ini terjadi jika $\theta = 0^\circ$ (v searah B) atau $\theta = 180^\circ$ (v berlawanan B). Dengan kata lain, muatan listrik yang bergerak sejajar medan magnet (searah atau berlawanan) tidak akan mengalami gaya magnet. Ketika gaya tidak ada, arah kecepatannya tetap dan akan menghasilkan lintasan lurus. Jadi, lintasan partikel bermuatan yang bergerak sejajar medan magnet berupa lintasan lurus.



Gambar 4.12

Partikel bermuatan tidak mendapat gaya ketika bergerak sejajar medan magnet sehingga lintasannya berupa garis lurus.

2. Lintasan Melingkar

Lintasan melingkar atau lingkaran terjadi jika partikel mendapatkan gaya yang arahnya tegak lurus terhadap kecepatan partikel dan selalu menuju ke titik yang sama (pusat lingkaran), yang disebut *gaya sentripetal*. Sekarang, tinjau partikel bermuatan yang bergerak tegak lurus memotong medan magnet seragam, seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.13**. Arah medan magnet (B) tegak lurus masuk bidang gambar, ditandai oleh $\times$. Partikel bermuatan negatif bergerak ke kanan dengan kecepatan v . Pada awalnya, partikel berada di titik P. Dengan menggunakan aturan tangan kanan, gaya (F) pada muatan di P berarah ke bawah. Akibatnya, partikel berbelok ke bawah dan sesaat kemudian berada di titik Q. Ketika di titik Q, arah gaya (F) masih tegak lurus kecepatan (v) dan berbelok lagi, demikian seterusnya. Oleh karena F selalu tegak lurus v dan besar kecepatan tetap, partikel bergerak melingkar beraturan. Perhatikan bahwa pada kasus tersebut, arah putaran lintasan searah putaran jarum jam. Sebaliknya, jika muatannya positif, arah putarannya berlawanan arah dengan putaran jarum jam.

Jari-jari lintasan partikel bermuatan yang bergerak memotong tegak lurus medan magnet dapat ditentukan sebagai berikut. Pada gerak melingkar beraturan, gaya yang arahnya menuju ke pusat lingkaran memenuhi

$$F_s = \frac{mv^2}{R}$$

Dalam kasus ini, gaya magnet adalah satu-satunya gaya yang arahnya menuju ke pusat lingkaran. Dengan kata lain, gaya magnet bertindak sebagai gaya sentripetal. Oleh karena v tegak lurus B atau $\theta = 90^\circ$, maka

$$F = Bqv \sin 90^\circ = Bqv$$

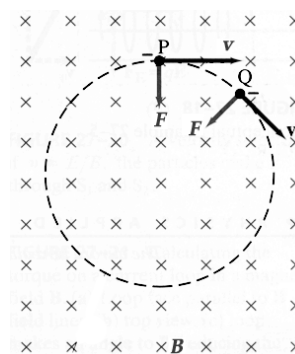
Oleh karena gaya magnet bertindak sebagai gaya sentripetal atau $F = F_s$ maka

$$Bqv = \frac{mv^2}{R}$$

sehingga diperoleh jari-jari lintasan partikel, yaitu

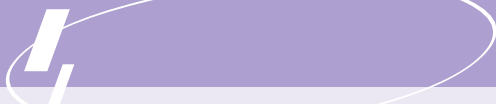
$$R = \frac{mv}{Bq}$$

(4-13)



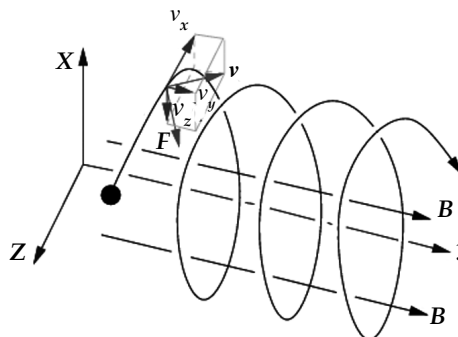
Gambar 4.13

Lintasan melingkar atau lingkaran terjadi ketika partikel bergerak memotong tegak lurus medan magnet (v tegak lurus B).



3. Lintasan Spiral atau Heliks

Bagaimanakah lintasan partikel jika kecepatannya membentuk sudut θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$ atau $90^\circ < \theta < 180^\circ$) terhadap medan magnet? Untuk itu, perhatikan **Gambar 4.14**. Partikel bermuatan positif bergerak dalam bidang xy dengan kecepatan v dan membentuk sudut θ terhadap medan magnet B , yang searah sumbu- y positif. Kecepatannya dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu v_x dan v_y .



Gambar 4.14

Lintasan spiral atau heliks terjadi ketika muatan bergerak dalam medan magnet dengan v dan B membentuk sudut θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$ atau $90^\circ < \theta < 180^\circ$)

Jelajah Fisika

Jatuh Bebas



Medan magnet yang ditimbulkan arus listrik dimanfaatkan pada akselerator partikel untuk membelokkan partikel-partikel yang bermuatan. Oleh karena itu, elektromagnet yang kuat dapat diatur untuk mengontrol, membengkokkan, dan memfokuskan garis edar partikel. Elektromagnet panjang dan berbentuk persegi empat yang tampak pada gambar di atas berada di pusat penelitian nuklir dekat Jenewa, Swiss.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Dalam kasus ini, partikel dipandang bergerak dalam dua dimensi, seolah-olah ada dua partikel terpisah yang bergerak masing-masing dengan kecepatan v_x searah sumbu- x positif dan v_y searah sumbu- y positif. Komponen kecepatan pada sumbu- x (v_x) tegak lurus medan magnet. Sesuai aturan tangan kanan, arah gaya F searah sumbu- z positif. Gaya ini menyebabkan partikel bergerak melingkar beraturan pada bidang xz (bidang sejajar gaya). Di lain pihak, komponen gerak pada sumbu- y (v_y) tidak mendapat gaya karena v_y sejajar B sehingga akan bergerak lurus searah v_y . Jadi, gerak partikel merupakan perpaduan antara gerak melingkar dan gerak lurus beraturan yang arah kecepatannya saling tegak lurus. Perpaduan kedua gerak seperti ini menghasilkan lintasan berupa spiral atau heliks.

Contoh 4.15

Sebuah partikel bermassa 40 gram dan bermuatan 1,6 C bergerak memotong tegak lurus medan magnet 2,5 mT dengan kecepatan 8 m/s. Tentukan jari-jari lintasan partikel.

Jawab

Diketahui: $m = 40 \text{ g} = 0,04 \text{ kg}$, $q = 1,6 \text{ C}$, $B = 2,5 \text{ mT} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ T}$, dan $v = 8 \text{ m/s}$. Jari-jari lintasan adalah

$$R = \frac{mv}{Bq} = \frac{(0,04 \text{ kg})(8 \text{ m/s})}{(2,5 \times 10^{-3} \text{ T})(1,6 \text{ C})} = 80 \text{ m}$$

Contoh 4.16

Sebuah partikel bermuatan listrik 50 C, dari keadaan diam, dipercepat dengan beda potensial 200 V sebelum memasuki daerah bermedan magnet seragam 0,4 T. Arah gerak partikel tegak lurus arah medan magnet sehingga partikel bergerak melingkar dengan jari-jari 10 cm. Tentukan massa partikel itu.

Jawab

Partikel dipercepat dengan beda potensial $V = 200 \text{ V}$ maka energi potensial listriknya berubah menjadi energi kinetik. Jika awalnya diam dan kecepatan akhirnya v , maka

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m}$$

sehingga diperoleh
 $(mv)^2 = 2mqV$ (i)

Dari **Persamaan (4.13)**, yaitu $R = \frac{mv}{Bq}$, diperoleh

$$mv = RBq \quad (ii)$$

Substitusikan (ii) ke (i) maka diperoleh $(RBq)^2 = 2mqV$ sehingga diperoleh massa partikel,

$$m = \frac{R^2 B^2 q}{2V} \quad (iii)$$

Selanjutnya, substitusikan $R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$, $B = 0,4 \text{ T}$, $q = 50 \text{ C}$ dan

$$V = 200 \text{ V ke (iii) maka diperoleh } m = \frac{R^2 B^2 q}{2V} = \frac{(0,1\text{m})^2 (0,4\text{T})^2 (50\text{C})}{(2)(200\text{V})} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg} = 0,2 \text{ g}.$$

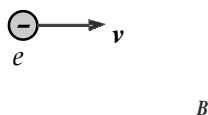
Kata Kunci

- Lintasan lurus
- Lintasan melingkar
- Lintasan spiral
- Partikel bermuatan

Soal Penguasaan Materi 4.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah elektron ditembakkan dengan kecepatan sebesar $5 \times 10^6 \text{ m/s}$ tegak lurus memasuki medan magnet seragam $3 \times 10^{-4} \text{ T}$, seperti diperlihatkan pada gambar berikut. Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan muatan elektron sebesar $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

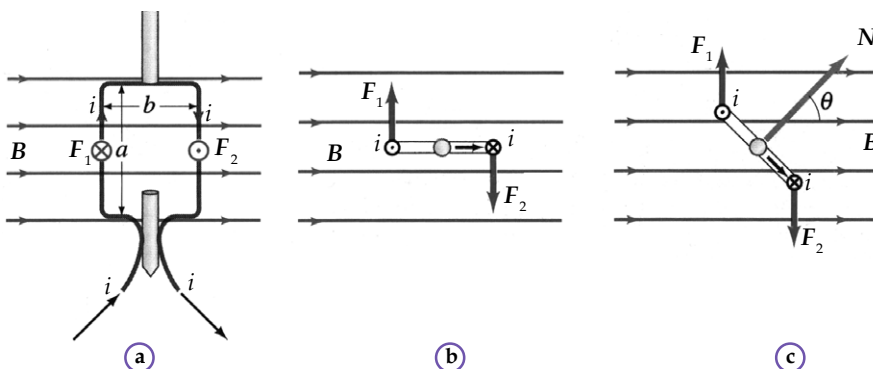


- Tentukan jari-jari lintasan elektron.
- Ke mana arah putaran lintasan elektron, searah atau berlawanan arah putaran jarum jam?

- Dua buah partikel bermuatan bergerak memotong tegak lurus medan magnet. Energi kinetik kedua partikel itu sama. Perbandingan massa partikel pertama dan massa partikel kedua adalah $2 : 1$ dan perbandingan muatan partikel pertama dan muatan partikel kedua $1 : 3$. Tentukan perbandingan jari-jari lintasan partikel pertama dan kedua.
- Sebuah partikel bermuatan yang bergerak dalam bidang xy dengan kecepatan 2 m/s dan membentuk sudut 30° terhadap sumbu- x berada dalam medan magnet seragam yang searah sumbu- y positif. Gambarkan bentuk lintasan partikelnya.

D Momen Gaya Magnet dan Motor Listrik

Pernahkah Anda bertanya mengapa kipas angin dapat berputar atau mengapa mobil mainan dapat bergerak ketika diberi baterai? Di antara Anda pasti ada yang sudah mengenal motor listrik, bukan? Nah, motor listriklah yang menyebabkan kipas angin dan roda mobil mainan dapat berputar. Sebenarnya, masih banyak penggunaan motor listrik dalam kehidupan sehari-hari, misalnya bor listrik, pengering rambut, dan pemutar antenna televisi.



Gambar 4.15

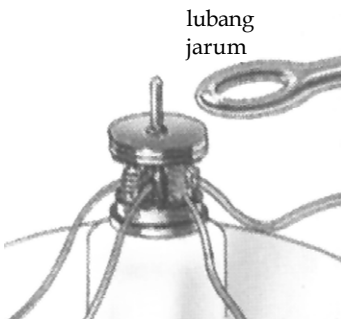
Momen gaya magnet pada kumparan:
 (a) tampak atas,
 (b) tampak depan, dan
 (c) ketika garis normal bidang kumparan membentuk sudut terhadap medan magnet.

Kata Kunci

- Momen gaya magnet
- Motor listrik
- Rotor/armatur

Jelajah Fisika

Motor mini



Motor mini dengan diameter 0,8 mm yang merupakan salah satu aplikasi medan magnet. Dapat terlihat perbandingan ukuran antara motor mini tersebut tidak jauh lebih besar dari sebuah lubang jarum.

Sumber: The Usborne Illustrated Dictionary of Science, 1999

Sebelum memahami lebih jauh tentang motor listrik, terlebih dahulu Anda tinjau momen gaya magnet yang merupakan prinsip dasar dari kerja motor listrik. Untuk itu, perhatikanlah **Gambar 4.15**. Kumparan kawat persegi panjang yang memiliki panjang a dan lebar b diletakkan di dalam medan magnet B , dengan B sejajar bidang kawat persegipanjang. Ketika kumparan dialiri arus listrik, seperti **Gambar 4.15 (a)**, panjang kawat a mendapat gaya magnet F_1 ke atas, sedangkan lebar kawat b mendapat gaya magnet F_2 ke bawah (gunakan aturan tangan kanan). Kedua gaya ini menghasilkan resultan momen gaya magnet untuk memutar kumparan sekitar sumbu rotasi, yang besarnya

$$\tau = \left(F_1 \frac{1}{2} l_1 \right) + \left(F_2 \frac{1}{2} l_1 \right) = \frac{1}{2} (F_1 + F_2) l_1$$

Besar gaya magnet $F_1 = F_2 = Bil_2$ maka

$$\tau = \frac{1}{2} (F_1 + F_2) l_1 = \frac{1}{2} (Bil_1 + Bil_2) l_1 = Bil_1 l_2$$

Jika kumparan terdiri dari N lilitan, besar momen gaya magnet yang dihasilkan adalah

$$\tau = NABi \quad (4-14)$$

dengan $A = l_1 l_2$ adalah luas penampang kumparan.

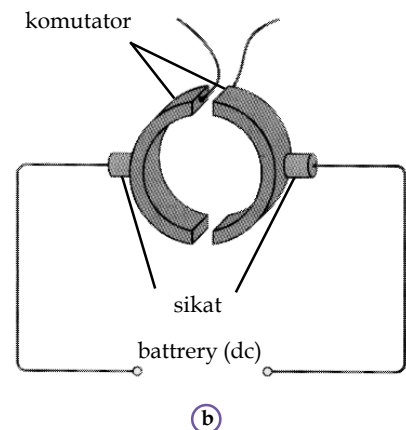
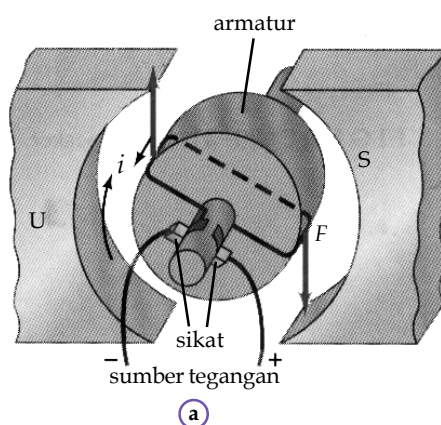
Perhatikan bahwa **Persamaan (4-14)** berlaku ketika garis normal (garis yang tegak lurus bidang kumparan) dan medan magnetik saling tegak lurus. Jika garis normal bidang membentuk sudut θ terhadap medan magnet, arah gaya F pada masing-masing kawat tidak berubah, tetapi lengan gayanya berubah dari $\frac{1}{2} l_1$ menjadi $\frac{1}{2} l_1 \sin \theta$ (lihat kembali konsep momen gaya di Kelas XI). Dengan demikian, besar momen gayanya menjadi

$$\tau = NABi \sin \theta \quad (4-15)$$

Meskipun **Persamaan (4-14)** dan **(4-15)** diturunkan dari kumparan persegipanjang, persamaan tersebut berlaku untuk semua bentuk kumparan.

Gambar 4.16

Motor listrik:
(a) skema sederhana, dan
(b) motor DC.



Motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi gerak rotasi (mekanik). **Gambar 4.16(a)** memperlihatkan diagram dari motor listrik sederhana. Kumparan kawat dililitkan pada sebuah silinder yang disebut

rotor atau *armatur*. Rotor dilekatkan pada sumbu putar. Sumber medan magnetnya adalah dua magnet tetap dengan kutub-kutub yang saling berhadapan, U dan S, seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.16(a)**. Ketika arus dialirkan melalui kumparan, timbullah momen gaya magnet pada kumparan yang akan menyebabkan kumparan berputar. Akan tetapi, ketika kumparan melewati posisi vertikal, gaya pada setiap bagian kumparan berbalik arah apabila arah arus tetap sehingga putaran kumparan akan berbalik arah pula. Agar putarannya kontinu ke satu arah, arah arus harus dibalik saat kumparan mencapai posisi kritis. Pada motor arus bolak-balik, keadaan tersebut bukanlah masalah karena arusnya sendiri bolak-balik. Pada motor arus searah, agar arusnya berbalik arah, digunakan komutator dan sikat-sikat, seperti diperlihatkan pada **Gambar 4.16(b)**. Setiap setengah putaran, komutator mengubah sambungannya dari satu sikat ke sikat lainnya. Dengan demikian, arus listrik pada kumparan berubah arah setiap setengah putaran.

Soal Penguasaan Materi 4.4

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Kumparan berbentuk lingkaran dengan jari-jari 10 cm berada dalam medan magnet 20 mT. Kumparan terdiri atas 15 lilitan. Jika kumparan dialiri arus listrik 5 A, tentukan momen gaya magnet maksimum yang bekerja pada kumparan.
- Tuliskanlah:
 - faktor-faktor yang memengaruhi besar momen gaya magnet, dan
 - empat kemungkinan (dari beberapa kemungkinan yang ada) yang dapat Anda lakukan agar momen gaya magnet maksimumnya menjadi dua kali dari sebelumnya.

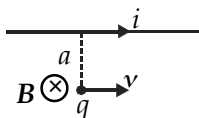
Pembahasan Soal SPMB

Sebuah penghantar yang lurus panjang dialiri arus listrik sebesar 1,5 A. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan 5×10^4 m/s searah arus dalam penghantar, pada jarak 0,1 m dari penghantar tersebut. Jika muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19}$ C, gaya pada elektron oleh arus dalam penghantar tersebut adalah

- $1,5 \times 10^{-20}$ N
- $2,4 \times 10^{-20}$ N
- $3,2 \times 10^{-20}$ N
- $4,2 \times 10^{-19}$ N
- 5×10^{-19} N

Penyelesaian

Diketahui: $i = 1,5$ A
 $v = 5 \times 10^4$ m/s
 $q = -1,6 \times 10^{-19}$ C
 $a = 0,1$ m



Timbul induksi medan magnetik di sekitar arus:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am})(1,5 \text{ A})}{2\pi(0,1 \text{ m})} = 30 \times 10^{-7} \text{ Wb}$$

Gaya pada elektron:

$$\begin{aligned} F &= Bqv \\ &= (30 \times 10^{-7} \text{ Wb})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(5 \times 10^4 \text{ m/s}) \\ &= 2,4 \times 10^{-20} \text{ N} \end{aligned}$$

Jawab: b

UMPTN 2001

Rangkuman

1. **Medan Magnet** adalah ruang di sekitar magnet yang masih dirasakan adanya gaya magnet. Hans Christian Oersted menemukan bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik disebut medan induksi.
2. Medan magnet induksi pada suatu titik yang berjarak a dari kawat lurus adalah

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}.$$

3. Medan magnet induksi di pusat lingkaran kawat melingkar berjari-jari a adalah

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a}.$$

4. **Solenoida** adalah kumpulan kawat yang terdiri dari banyak lilitan. Medan magnet induksi di tengah-tengah solenoida adalah

$$B_0 = \frac{\mu_0 i N}{L},$$

sedangkan di ujung solenoida adalah

$$B_n = \frac{1}{2} B_0.$$

5. **Toroida** adalah solenoida yang melingkar. Medan magnet di dalam sumbu lilitan toroida adalah

$$B = \frac{\mu_0 N}{2\pi a}.$$

6. **Gaya magnet** pada kawat berarus sebanding dengan medan magnet, kuat arus, dan panjang kawat.

$$f = Bil \sin \theta.$$

7. Gaya pada dua buah kawat sejajar berarus listrik searah akan tarik menarik. Sebaliknya, gaya pada dua kawat sejajar berarus listrik berlawanan arah akan saling tolak-menolak.

$$F = \frac{\mu i_1 i_2}{2\pi a} l.$$

8. Gaya pada sebuah muatan bergerak dalam medan magnet dengan kecepatan v adalah

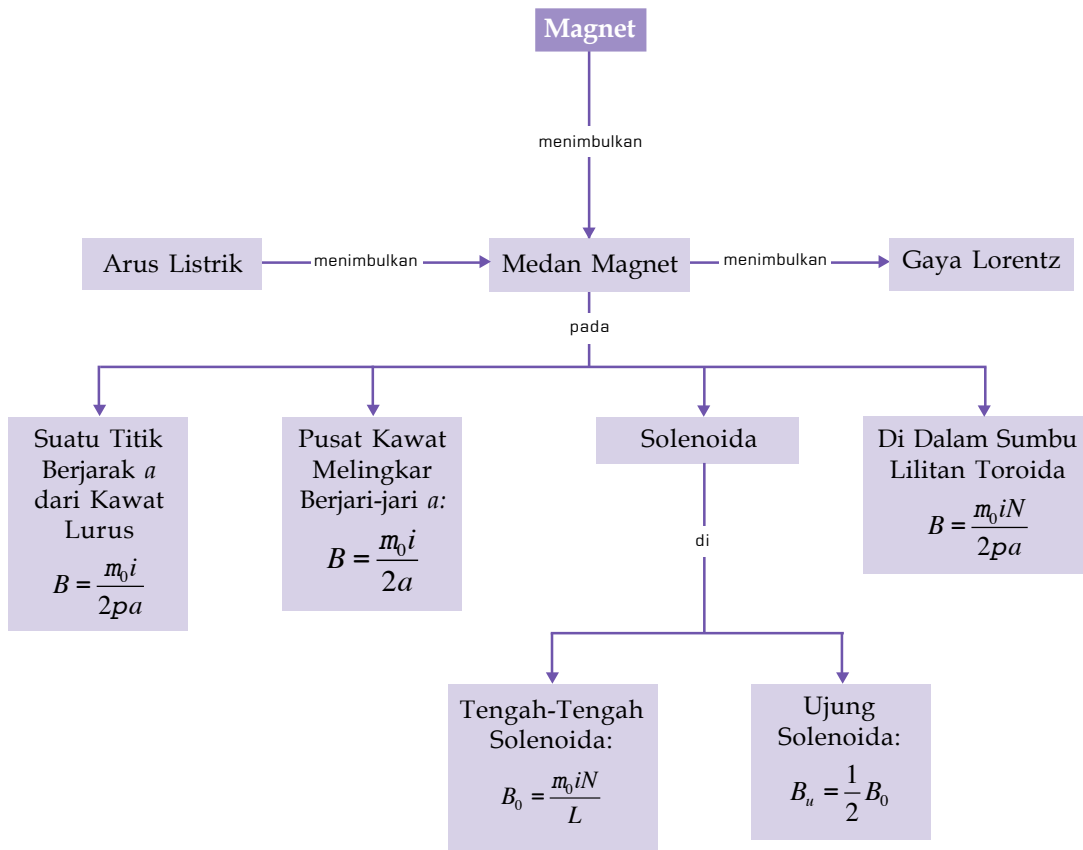
$$F = Bqv \sin \theta.$$

9. Terdapat tiga macam lintasan partikel bermuatan listrik dalam medan magnet homogen, yaitu lintasan lurus, melingkar, dan spiral.

10. **Momen gaya** pada kumpulan kawat persegi panjang berarus yang diletakkan di dalam medan magnet adalah

$$\tau = NAB \sin \theta.$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Induksi Magnet, Anda dapat menerapkan induksi magnet dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi. Jika Anda belum mampu menerapkan induksi magnet dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi, Anda belum menguasai materi bab Induksi Magnet dengan

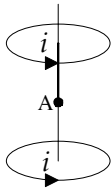
baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 4

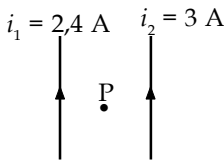
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Arus listrik mengalir sepanjang kawat listrik tegangan tinggi dari utara ke selatan. Arah medan magnet yang diakibatkan arus listrik di timur kawat adalah ke
 - selatan
 - utara
 - barat
 - atas
 - bawah

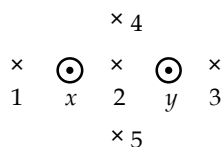
- Dua kawat kumparan identik berarus listrik sama besar dan searah, yaitu i . Titik A berada di tengah-tengah garis penghubung kedua titik pusat kumparan. Anak panah yang paling tepat untuk menyatakan arah medan magnet di titik A adalah



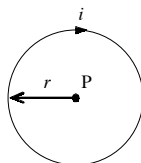
- Dua kawat panjang diletakkan sejajar pada jarak 10 cm satu sama lain seperti diperlihatkan pada gambar. Kawat dialiri arus sebesar 2,4 A dan kawat kedua 3 A. Jika $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}^{-1}$, induksi magnet di titik P yang terletak di antara kedua kawat pada jarak 4 cm dari kawat pertama adalah



- Pada gambar berikut, x dan y adalah dua kawat yang dialiri arus sama, dengan arah menuju pembaca. Supaya tidak dipengaruhi oleh medan magnet, sebuah kompas harus diletakkan di titik



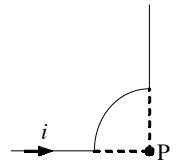
- Sebuah loop arus berbentuk lingkaran berjari-jari r dialiri arus i yang menimbulkan medan induksi (imbias) magnet B di pusatnya P seperti pada gambar berikut. Besar dan arah B tersebut adalah



- $\frac{\mu_0 i}{2r}$, tegak lurus keluar bidang gambar
- $\frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, tegak lurus keluar bidang gambar

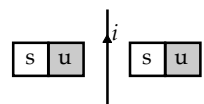
- $\frac{\mu_0 i}{2\pi r}$, tegak lurus masuk bidang gambar
- $\frac{\mu_0 i}{2r}$, tegak lurus masuk bidang gambar
- nol

- Kawat $\frac{1}{4}$ lingkaran dengan jari-jari 3 meter dialiri arus 6 ampere. Besar induksi magnet pada pusat lingkaran (P) adalah



- $\pi \times 10^{-5} \text{ T}$
 - $\pi \times 10^{-7} \text{ T}$
 - $4\pi \times 10^{-5} \text{ T}$
 - $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}$
 - $7\pi \times 10^{-7} \text{ T}$
- Solenoida dengan 100 lilitan dan panjang 2,0 m dialiri arus listrik 5,0 A. Besar induksi magnet di tengah solenoida adalah ($\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$)
 - Sebuah kawat lurus panjang diletakkan berimpit dengan sumbu solenoida. Solenoida menghasilkan medan magnet $4 \times 10^{-3} \text{ T}$ di dalamnya. Jika kawat lurus dialiri arus 60 A, besar medan magnet pada titik-titik berjarak 3 mm dari sumbu solenoida adalah

- Sebuah kawat lurus sejajar berada di antara dua kutub magnet berlawanan seperti diperlihatkan pada gambar. Ketika kawat dialiri arus listrik, kawat tersebut akan



- bergerak menuju kutub S
 - bergerak menuju kutub U
 - bergerak menuju pembaca
 - bergerak menjauhi pembaca
 - tetap diam
- Besar gaya magnet pada seutas kawat lurus berarus listrik *tidak* dipengaruhi oleh
 - Sebuah kawat lurus berarus listrik 40 A berada dalam medan magnet seragam 0,2 T yang

membentuk sudut 30° terhadap arah arus pada kawat. Gaya magnet yang dialami kawat jika panjang kawat 3 m adalah

- a. 6 N
- b. 8 N
- c. 12 N
- d. 20 N
- e. 24 N

12. Dua buah kawat lurus sejajar masing-masing dialiri arus i dan terpisah pada jarak a . Besar gaya magnet pada tiap kawat sebanding dengan

- a. $\frac{i}{a}$
- b. $\frac{i^2}{a}$
- c. $\frac{i}{a^2}$
- d. $\frac{a}{i}$
- e. $\frac{a}{i^2}$

13. Jika dua kawat lurus sejajar dialiri arus listrik, gaya magnet per satuan panjang pada salah satu kawat adalah ...

- a. seperempat kali gaya magnet pada kawat lainnya
- b. setengah kali gaya magnet pada kawat lainnya
- c. sama dengan gaya magnet pada kawat lainnya
- d. dua kali gaya magnet pada kawat lainnya
- e. empat kali gaya magnet pada kawat lainnya

14. Sebuah kawat lentur kedua ujungnya disambungkan dan diletakkan di atas meja yang berada dalam medan magnet seragam dengan arah tegak lurus permukaan meja. Semula, kawat membentuk bidang tidak beraturan. Jika kawat tersebut dialiri arus listrik, bidang yang dibentuk kawat menjadi

- a. persegi
- b. lingkaran
- c. elips
- d. spiral
- e. berusaha membentuk dua kawat lurus sejajar

15. Tiga buah kawat sejajar satu sama lain dan dialiri arus i dengan arah yang sama. Garis hubung ketiga kawat membentuk sebuah segitiga samasisi dengan panjang sisi a . Gaya per satuan panjang yang dialami setiap kawat adalah

- a. $\frac{\mu_0 i^2}{2\pi a}$
- b. $\frac{\mu_0 i^2}{4\pi a} \sqrt{2}$
- c. $\frac{\mu_0 i^2}{2\pi a} \sqrt{2}$
- d. $\frac{\mu_0 i^2}{4\pi a} \sqrt{3}$
- e. $\frac{\mu_0 i^2}{2\pi a} \sqrt{3}$

16. Besar gaya yang dialami sebuah partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet bergantung pada hal-hal berikut, *kecuali*

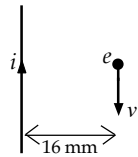
- a. massa partikel
- b. arah gerak partikel
- c. besar kecepatan partikel
- d. besar muatan partikel
- e. besar medan magnet

17. Partikel bermuatan listrik $2 \mu\text{C}$ bergerak dengan kelajuan $5 \times 10^4 \text{ m/s}$ sejajar dengan medan magnet

seragam 0,8 T. Gaya magnet yang dialami muatan adalah

- a. nol
- b. $2 \times 10^{-2} \text{ N}$
- c. $4 \times 10^{-2} \text{ N}$
- d. $6 \times 10^{-2} \text{ N}$
- e. $8 \times 10^{-2} \text{ N}$

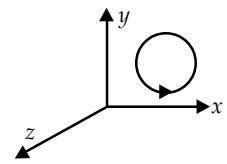
18. Sebuah kawat penghantar lurus panjang yang dialiri arus listrik $i = 4 \text{ A}$ terletak di ruang hampa. Sebuah elektron bergerak lurus sejajar dengan kawat dan berlawanan arah dengan arah arus, dengan laju $5 \times 10^4 \text{ m/s}$.



Jika jarak elektron dari kawat 16 mm, gaya magnet yang dialami elektron besarnya

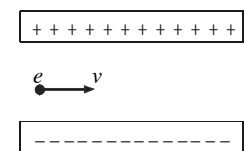
- a. $2 \times 10^{-19} \text{ N}$ menuju kawat
- b. $2 \times 10^{-19} \text{ N}$ menjauhi kawat
- c. $4 \times 10^{-19} \text{ N}$ menuju kawat
- d. $4 \times 10^{-19} \text{ N}$ menjauhi kawat
- e. $4 \times 10^{-20} \text{ N}$ menuju kawat

19. Sebuah proton bergerak searah sumbu $-x$ positif dan masuk ke dalam medan magnet seragam sehingga menjalani gerak melingkar pada bidang xy seperti terlihat pada gambar. Ini berarti bahwa medan magnet tersebut searah dengan sumbu



- a. x positif
- b. y negatif
- c. y positif
- d. z negatif
- e. z positif

20. Sebuah elektron ditembakkan sejajar keping di antara dua keping berlawanan muatan seperti diperlihatkan pada gambar disamping. Agar lintasan elektron lurus, medan magnet seragam harus diberikan dengan arah

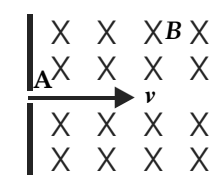


- a. masuk tegak lurus bidang kertas
- b. keluar tegak lurus bidang kertas
- c. menuju keping positif
- d. menuju keping negatif
- e. searah gerak elektron

21. Sebuah elektron dengan energi kinetik 5.000 eV memasuki daerah bermedan magnet seragam sebesar 200 gauss yang tegak lurus terhadap arah geraknya. Jari-jari lintasan elektron dalam medan magnet tersebut adalah

- a. 0,12 cm
- b. 1,2 cm
- c. 12 cm
- d. 120 cm
- e. 1.200 cm

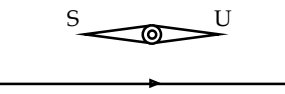
22. Sebuah partikel bermassa m , bermuatan $+q$, dan kecepatannya v ditembakkan tegak lurus pada medan magnet serbasama B seperti gambar di samping. Di dalam medan magnet tersebut,



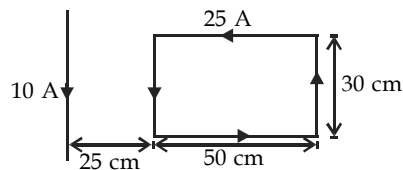


- 1) partikel akan bergerak melingkar berlawanan dengan arah jarum jam,
 - 2) percepatan partikel $a = \frac{qvB}{m}$,
 - 3) jarak terjauhnya dari A adalah $a = 2 \frac{mv}{qV}$,
 - 4) laju partikel berubah selama berada dalam medan magnetik.
- Pernyataan yang benar adalah
- a. 1, 2, dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4
23. Perbandingan massa dua buah partikel $m_1 : m_2 = 2 : 1$ dan muatannya $q_1 : q_2 = 1 : 3$. Kedua partikel tersebut bergerak melingkar dalam medan magnet seragam dengan momentum yang sama. Perbandingan jari-jari kedua partikel ($R_1 : R_2$) adalah
- a. 1 : 2
 - b. 1 : 3
 - c. 1 : 6
 - d. 2 : 1
 - e. 6 : 1
24. Sebuah partikel bermuatan listrik bergerak dalam bidang yz dengan kecepatan v di dalam medan magnet B yang sejajar sumbu z . Jika v membentuk sudut 30° terhadap sumbu y positif, lintasan partikel tersebut berupa
- a. garis lurus sejajar sumbu- y
 - b. lingkaran dengan sumbu sejajar sumbu- y
 - c. lingkaran dengan sumbu sejajar sumbu- x
 - d. spiral dengan sumbu sejajar sumbu- z
 - e. spiral dengan sumbu sejajar dengan sumbu- x
25. Sebuah kawat berbentuk lingkaran berjari-jari 2 cm berada dalam medan magnet seragam 0,1 T yang arahnya sejajar sumbu lingkaran. Jika kawat dialiri arus 5 A, momen gaya magnet maksimum yang bekerja pada kawat adalah
- a. $\pi \times 10^{-4}$ Nm
 - b. $2\pi \times 10^{-4}$ Nm
 - c. $3\pi \times 10^{-4}$ Nm
 - d. $4\pi \times 10^{-4}$ Nm
 - e. $5\pi \times 10^{-4}$ Nm

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Perhatikan gambar di samping. Ke arah mana jarum kompas akan menyimpang?
- 
2. Dua buah kawat lurus sejajar terpisah pada jarak 10 cm dan masing-masing dialiri arus 2 A dan 6 A dengan arah sama. Tentukan letak titik yang kuat medannya nol dihitung dari salah satu kawat.
 3. Dua buah kawat lurus sejajar berarus listrik. Bagaimanakah arah arus pada masing-masing kawat sehingga kedua kawat saling menjauhi?
 4. Pada model atom Bohr, sebuah elektron bergerak mengelilingi inti atom hidrogen dalam lintasan berbentuk lingkaran berjari-jari $5,3 \times 10^{-11}$ m dengan kelajuan $2,2 \times 10^6$ m/s. Jika muatan elektron $1,6 \times 10^{-19}$ C, berapakah besar medan magnet pada inti atom akibat gerakan elektron tersebut?
 5. Dua buah kawat lurus berarus listrik bersilangan tegak lurus satu sama lain pada jarak tertentu. Apakah pada kawat terjadi gaya aksi-reaksi? Mengapa demikian?
 6. Sebuah solenoida dibuat dari seutas kawat sepanjang 31,4 m yang penampangnya berdiameter 1,6 mm. Diameter penampang solenoida 5 cm. Ujung-ujung solenoida dihubungkan dengan sumber tegangan 220 V dengan daya maksimum 110 W.

- (a) Berapakah jumlah lilitan dan panjang solenoida?
 - (b) Berapakah medan magnet maksimum di tengah-tengah solenoida?
7. Dapatkah massa partikel bermuatan ditentukan dengan melewatkannya dalam medan magnet? Bagaimana caranya? Faktor-faktor apa saja yang Anda ukur?
 8. Kawat persegi panjang ABCD dialiri arus 25 A kemudian diletakkan di dekat kawat lurus seperti diperlihatkan pada gambar.



- Kawat lurus dialiri arus 10 A. Tentukan besar gaya yang dialami kawat lurus.
9. Tuliskan faktor-faktor yang dapat mempercepat putaran motor listrik.
 10. Sebuah elektron dipercepat pada beda potensial 200 V sebelum memasuki tegak lurus medan magnet 20 mT. Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan muatan elektron $1,6 \times 10^{-19}$ C.
 - a. Tentukan besar kecepatan elektron dalam medan magnet.
 - b. Berapa jari-jari lintasan elektron?

Kegiatan Semester 1

Pada Bab 4, Anda telah mempelajari salah satu hasil eksperimen Oersted yang menunjukkan bahwa kawat berarus listrik mengalami gaya ketika berada di dalam medan magnet yang dihasilkan sebuah magnet tetap. Untuk lebih memahami proses terjadinya gaya magnet pada suatu benda berarus maka pada **Kegiatan Penelitian Semester 1**, Anda akan membuat alat percobaan sederhana sebagai simulasi dari hasil eksperimen yang diperoleh Oersted.

Kegiatan ini dilakukan secara berkelompok dan dikerjakan dalam waktu dua minggu. Selama pengerjaan kegiatan berlangsung, Anda diharapkan mampu bekerja sama dengan baik dan dapat bertanya kepada guru Fisika Anda, jika ada hal-hal yang belum Anda pahami. Setelah selesai, laporkanlah hasil kegiatan Anda dalam bentuk laporan tertulis. Berikut adalah uraian kegiatan yang harus Anda lakukan.

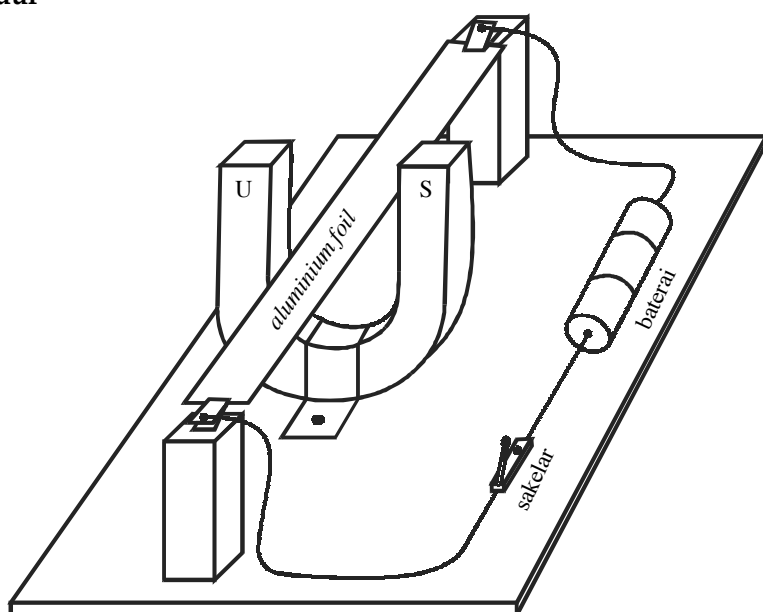
Tujuan

Membuat alat percobaan gaya magnet (Lorentz) untuk mengamati gaya magnet pada sebuah benda berarus listrik di dalam medan magnet.

Alat dan Bahan

1. Dua lembar *aluminium foil* dengan masing-masing ukuran (1×15) cm dan (1×20) cm
2. Dua buah magnet U dengan ukuran yang berbeda
3. Enam buah baterai (@ 1,5 volt)
4. Sebuah sakelar
5. Dua buah penjepit buaya
6. Kawat tembaga/kabel (+ 1 meter)
7. Sebuah papan berukuran (30×25) cm
8. Dua buah kayu yang panjangnya 15 cm
9. Selembar seng berukuran (2×10) cm dan beberapa sekrup kecil

Prosedur





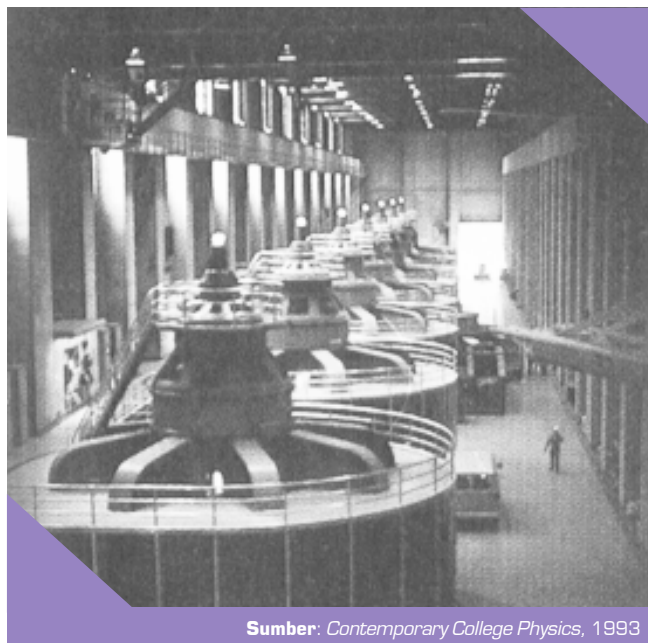
1. Siapkanlah papan, magnet U, dan dua buah kayu. Letakkanlah magnet U di antara kedua kayu yang berdiri dan sejajar, kemudian kuatkan dengan seng dan sekrup.
2. Buatlah rangkaian sederhana yang terdiri atas tiga buah baterai, sakelar, dan *aluminium foil* berukuran (1 × 15) cm, yang dihubungkan dengan kawat tembaga. Posisikan *aluminium foil* di antara kedua kutub magnet U seperti gambar.
3. Tutuplah sakelar agar arus listrik mengalir dari baterai melalui *aluminium foil*. Apakah yang terjadi dengan *aluminium foil*?
4. Balikkan polarisasi ketiga baterai, kemudian lakukan langkah yang sama. Apakah yang terjadi dengan *aluminium foil*?
5. Gantilah magnet U dengan magnet U yang lebih besar tanpa menambah jumlah baterai dan panjang *aluminium foil*. Amati yang terjadi dengan *aluminium foil*.
6. Tambahkan jumlah baterai menjadi 6 baterai tanpa mengganti magnet U dan panjang *aluminium foil*. Amati yang terjadi dengan *aluminium foil*.
7. Gantilah *aluminium foil* dengan *aluminium foil* yang lebih panjang tanpa mengganti magnet U dan menambah baterai. Amati kembali yang terjadi dengan *aluminium foil*.
8. Apa yang dapat Anda simpulkan dari kegiatan tersebut?

Pertanyaan

1. Bagaimanakah pengaruh medan magnet terhadap *aluminium foil* yang berarus listrik?
2. Bagaimanakah cara menentukan arah gaya magnet pada *aluminium foil*? Apakah cara tersebut sesuai dengan hasil kegiatan yang Anda lakukan?
3. Bagaimanakah pengaruh pergantian magnet U dengan magnet U yang lebih besar terhadap gaya magnet yang dialami *aluminium foil*?
4. Bagaimanakah pengaruh penambahan jumlah baterai terhadap gaya magnet yang dialami *aluminium foil*?
5. Bagaimanakah pengaruh penambahan panjang *aluminium foil* terhadap gaya magnet yang dialami *aluminium foil*?
6. Jika posisi *aluminium foil* diatur sedemikian sehingga sudut antara arus listrik i dan medan magnet B tidak sama dengan 90° , apakah yang terjadi dengan gaya magnet yang dialami *aluminium foil*?

Laporan Kegiatan

Setelah Anda selesai mengamati gaya magnet pada *aluminium foil* melalui alat percobaan yang telah Anda buat, laporkanlah hasil kegiatan Anda dalam bentuk laporan kegiatan. Laporan kegiatan disusun secara bersama dalam setiap kelompok dan diketik pada kertas HVS ukuran A4. Adapun isi laporan kegiatan terdiri atas Judul, Latar Belakang Masalah, Identifikasi Masalah, Tujuan Penelitian, Alat dan Bahan, Prosedur Penelitian, Hasil, dan Pembahasan, Kesimpulan dan Saran, serta Daftar Pustaka. Jika ada hal-hal yang belum Anda pahami mengenai proses penyusunan laporan kegiatan, Anda dapat bertanya kepada guru Fisika. Selamat bekerja.



Sumber: Contemporary College Physics, 1993

5

B a b 5

Induksi Elektromagnetik dan Arus Listrik Bolak-Balik

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk menerapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi dengan cara memformulasikan konsep induksi Faraday dan arus bolak-balik serta penerapannya.

Pada pembahasan sebelumnya, Anda telah mengetahui hubungan antara kemagnetan dan kelistrikan yang dikemukakan oleh Oersted, yakni arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Jika demikian, pernahkah Anda berpikir mengenai kemungkinan berlakunya prinsip kebalikan dari penemuan Oersted tersebut? Dengan kata lain, mungkinkah medan magnet dapat menghasilkan arus listrik?

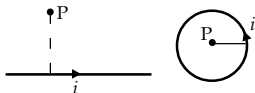
Pembahasan tersebut sebenarnya sudah ada dan telah terjawab sejak 1831 oleh Michael Faraday (1791–1897) sehingga sampai saat ini telah memberikan perubahan yang signifikan pada kehidupan manusia, misalnya generator arus listrik bolak-balik. Generator arus listrik bolak-balik dapat mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dan salah satunya dimanfaatkan dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTA).

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari teori dan aplikasi yang berhubungan dengan arus listrik bolak-balik yang dihasilkan oleh medan magnet, serta penjelasan mengenai arus listrik bolak-balik itu sendiri yang disertai dengan komponen-komponen dan rangkaian-rangkaiannya.

- A. Induksi Elektromagnetik**
- B. Beberapa Aplikasi Induksi Elektromagnetik**
- C. Persamaan Arus Listrik Bolak-Balik**
- D. Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik**
- E. Rangkaian AC RLC Seri**
- F. Daya pada Rangkaian AC**

Soal Pramateri

1. Apakah yang Anda ketahui tentang hubungan antara kemagnetan dan kelistrikan?
2. Perhatikanlah gambar berikut.



- Ke manakah arah medan magnet di titik P?
3. Apakah yang Anda ketahui tentang arus listrik bolak-balik (AC)?

A Induksi Elektromagnetik

Pada Bab 4, Anda telah mengetahui bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Dalam sains berlaku prinsip simetri atau kebalikan. Jika arus listrik menimbulkan medan magnet, apakah medan magnet menghasilkan arus listrik? **Michael Faraday** (1791–1867) adalah orang yang telah menemukan gejala tersebut. Faraday menemukan bahwa perubahan fluks magnet dapat menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) dan arus listrik induksi. Gejala ini disebut *induksi elektromagnetik* dan aplikasinya akan dibahas lebih rinci pada bab ini.

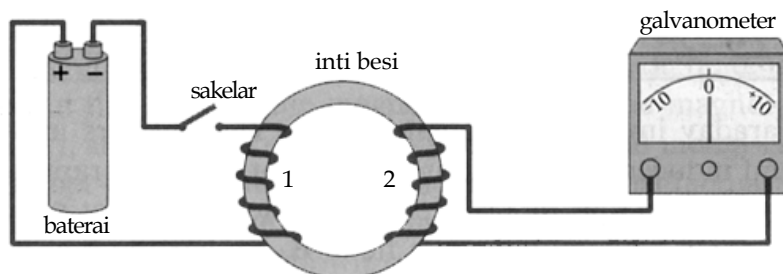
1. Eksperimen Faraday dan Hukum Lenz

a. Eksperimen Faraday

Untuk menemukan jawaban apakah medan magnet menghasilkan arus listrik, Faraday melakukan eksperimen dengan susunan peralatan seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.1**. Kumparan pertama dihubungkan ke sebuah baterai dan kumparan kedua dihubungkan ke galvanometer. Faraday berharap arus pada kumparan pertama menghasilkan medan magnet yang cukup besar untuk menghasilkan arus pada kumparan kedua. Ketika sakelar dihubungkan, jarum galvanometer menyimpang sesaat dan segera kembali ke posisi nol dan tetap nol ketika arusnya konstan. Hal tersebut menunjukkan bahwa arus konstan pada kumparan pertama tidak menghasilkan arus listrik pada kumparan kedua. Akan tetapi, ketika sakelar diputus-sambungkan, jarum galvanometer menyimpang ke kiri dan ke kanan.

Gambar 5.1

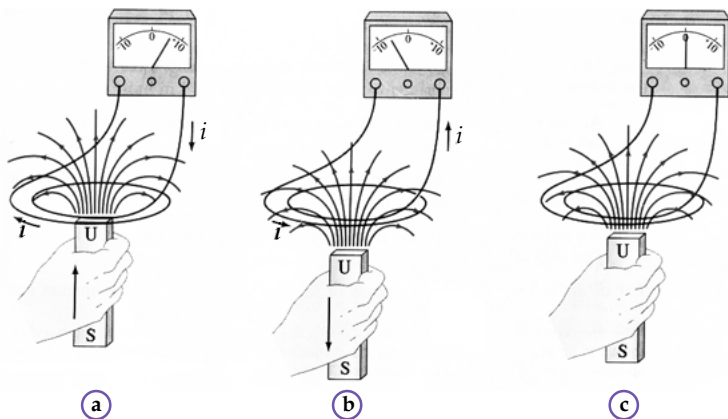
Skema peralatan eksperimen Faraday.



Sumber: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000

Dari hasil eksperimen tersebut, Faraday menyimpulkan bahwa perubahan medan magnet menghasilkan arus listrik. Oleh karena arus listrik mengalir jika ada sumber tegangan, dapat pula dikatakan bahwa perubahan medan magnet menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Arus dan GGL yang timbul akibat perubahan medan magnet disebut *arus* dan *GGL induksi*, sedangkan peristiwa munculnya arus dan GGL induksi akibat perubahan medan magnet disebut *induksi elektromagnetik*.

Selain eksperimen tersebut, Faraday melakukan eksperimen lanjutan dengan menggunakan magnet tetap dan kumparan, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.2**. GGL induksi muncul pada kumparan ketika magnet digerakkan keluar-masuk kumparan. GGL induksi juga terjadi ketika magnetnya diam dan kumparannya bergerak maju-mundur. Jadi, gerakan relatif antara magnet dan kumparan diperlukan untuk menghasilkan GGL induksi.



Gambar 5.2

GGL induksi timbul ketika ada gerak relatif antara magnet dan kumparan.
(a) Magnet bergerak masuk.
(b) Magnet bergerak keluar.
(c) Magnet tidak bergerak.

Sumber: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 2000

Anda tentu ingin membuktikan percobaan Faraday, bukan? Untuk itu, lakukanlah kegiatan sederhana berikut ini secara berkelompok.

Mahir Meneliti 5.1

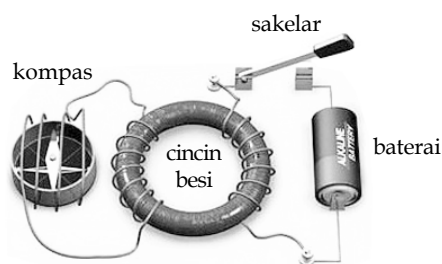
Membuktikan Percobaan Faraday

Alat dan Bahan

1. Sebuah kompas
2. Kawat tembaga (2 m)
3. Cincin besi
4. Baterai
5. Sakelar

Prosedur

1. Siapkan alat dan bahan, kemudian susunlah seperti gambar di samping.
2. Kumparan pertama dihubungkan ke sebuah baterai, sedangkan kumparan kedua dililitkan pada sebuah kompas.
3. Tutuplah sakelar S. Apakah yang terjadi pada jarum kompas?
4. Bukalah sakelar S. Apakah yang terjadi pada jarum kompas?
5. Tutup dan bukalah saklar S secara bergantian dan terus-menerus. Apakah yang akan terjadi pada jarum kompas?
6. Apa yang dapat Anda simpulkan dari percobaan tersebut? Apakah hasilnya sama dengan hasil yang diperoleh Faraday?



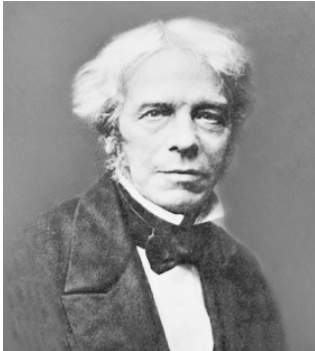
Sumber: nzjp.rsnz.org

b. Hukum Lenz

Arus induksi yang dihasilkan oleh gerakan keluar-masuk magnet dalam kumparan ternyata bolak-balik. Bagaimana kaitan antara gerakan tersebut dan arah arus induksi? Berkaitan dengan hal tersebut, **Lenz** mengemukakan bahwa arus induksi selalu menimbulkan medan magnet induksi berlawanan dengan perubahan medan magnet asalnya. Pernyataan tersebut dikenal sebagai Hukum Lenz. Untuk memahami penerapan Hukum Lenz, perhatikanlah contoh berikut ini.

Jelajah Fisika

Michael Faraday
(1791–1867)



Michael Faraday ialah ilmuwan Inggris yang mendapat julukan "Bapak Listrik". Ia mempelajari berbagai bidang ilmu pengetahuan, termasuk elektromagnetik dan elektrokimia. Efek magnetik menuntunnya menemukan ide-ide yang menjadi dasar teori medan magnet.

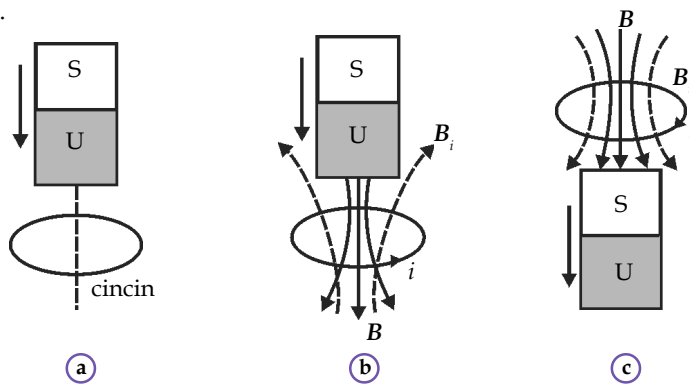
Sumber: www.wikipedia.org

Contoh 5.1

Sebuah magnet batang jatuh bebas melalui lintasan yang berimpit dengan sumbu cincin kawat seperti diperlihatkan pada **Gambar (a)**. Tentukan arah arus pada cincin.

Jawab

Mula-mula, tinjau ketika magnet batang menuju (mendekati) cincin, seperti diperlihatkan pada **Gambar (b)**. Arah garis-garis gaya medan magnet yang dihasilkan oleh magnet batang (B) seperti diperlihatkan pada gambar. Bayangkan, semula hanya beberapa buah garis gaya medan magnet yang masuk ke dalam cincin. Ketika magnet batang mendekat, garis-garis gaya medan magnet yang masuk ke dalam cincin semakin banyak. Perubahan tersebut akan menimbulkan arus induksi pada cincin. Arus tersebut muncul untuk melawan perubahan garis gaya. Oleh karena garis gaya bertambah, berarti arus induksi muncul untuk mengurangi garis gaya tersebut. Dengan demikian, arah garis gaya magnet oleh arus induksi (B_i) adalah berlawanan dengan arah garis gaya magnet yang dihasilkan oleh magnet batang (B). Sesuai aturan tangan kanan, ibu jari menunjukkan B_i dan jari-jari lainnya menunjukkan i , arah arus induksi pada cincin adalah berlawanan arah putaran jarum jam.



Sekarang, tinjau ketika magnet batang telah melewati cincin dan meninggalkan (menjauhi) cincin. Garis-garis gaya magnet (B) yang masuk cincin menjadi berkurang sehingga arus induksi muncul untuk menambah garis gaya tersebut. Akibatnya, B_i searah dengan B , seperti diperlihatkan pada **Gambar (c)**. Sesuai dengan kaidah tangan kanan, arah arus induksi searah putaran jarum jam. Secara keseluruhan, peristiwa tersebut menghasilkan arus bolak-balik, yakni arah arus induksi pada cincin yang semula berlawanan arah putaran jarum jam, kemudian menjadi searah putaran jarum jam.

Hukum Lenz dapat Anda buktikan dengan melakukan percobaan sederhana berikut.

Mahir Meneliti 5.2

Mengamati Arah Medan Magnet Induksi yang Ditimbulkan oleh Arus Induksi

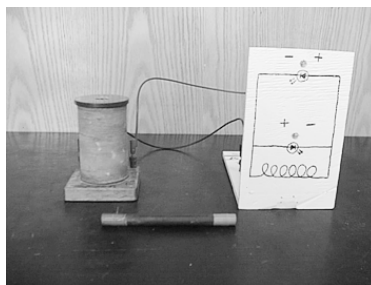
Alat dan Bahan

1. Sebuah magnet batang
2. Kumparan kawat tembaga
3. Dua buah LED (*Light Emitting Diode*)

Prosedur

1. Siapkan alat dan bahan, kemudian susunlah seperti pada gambar.
2. Rangkailah dua buah LED secara paralel dengan arah yang berlawanan, kemudian hubungkan rangkaian tersebut pada kumparan.
3. Masukkanlah kutub U magnet batang ke dalam kumparan. Apakah yang terjadi pada kedua LED?

4. Keluarkanlah magnet batang dari dalam kumparan. Apakah yang terjadi pada kedua LED?
5. Lakukanlah percobaan yang sama, tetapi kutub magnet yang dimasukkan ke dalam kumparan diganti dengan kutub S. Amati yang terjadi pada kedua LED.
6. Apakah yang dapat Anda simpulkan dari percobaan tersebut?



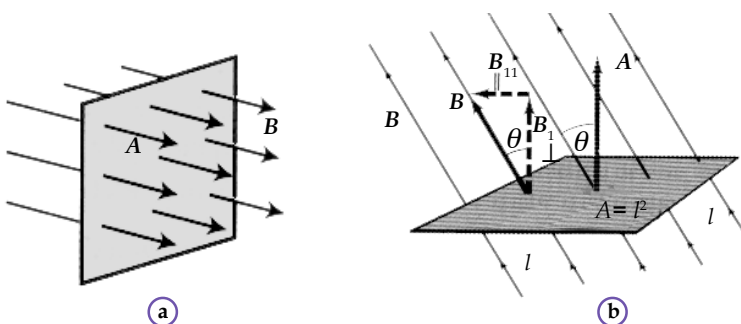
Sumber: www.phys.ufl.edu

2. GGL Induksi

Dari berbagai eksperimen induksi elektromagnetik yang dilakukannya, Faraday lebih jauh menemukan bahwa besaran yang berpengaruh terhadap munculnya arus induksi adalah *fluks magnet*. Fluks magnet adalah jumlah garis-garis gaya medan magnet yang menembus tegak lurus bidang dengan luas tertentu, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.3(a)**. Secara umum, jika garis gaya medan magnet membentuk sudut θ dengan normal bidang (**Gambar 5.3(b)**), fluks magnetnya memenuhi persamaan

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (5-1)$$

Persamaan (5-1) memperlihatkan bahwa fluks magnet dapat berubah dengan cara mengubah minimum salah satu besaran, antara lain medan magnet B , luas penampang kumparan A , atau sudut θ . Gerakan magnet batang dalam kumparan pada dasarnya mengubah besar medan magnet yang dilingkupi kumparan. Perubahan luas kumparan dapat dilakukan dengan menggerakkan batang konduktor memotong medan magnet. Perubahan sudut θ dapat dilakukan dengan cara memutar kumparan dalam medan magnet.



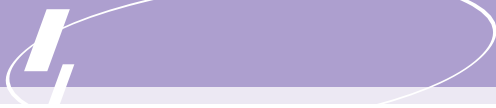
Gambar 5.3

Medan magnet tegak
(a) lurus bidang, dan
(b) membentuk sudut θ dengan normal bidang.

Jika terjadi perubahan fluks magnet pada kumparan, GGL atau arus induksi akan muncul pada kumparan tersebut. Hasil eksperimen Faraday menunjukkan bahwa besar GGL induksi pada kumparan sebanding dengan laju perubahan fluks magnet dan jumlah lilitan kumparan. Secara matematis, GGL induksi sesaat dituliskan

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-2)$$

dengan: ε = GGL induksi sesaat (volt),
 N = jumlah lilitan, dan
 $\frac{d\Phi}{dt}$ = laju perubahan fluks (weber/sekon).



Jangan Lupa

Turunan (diferensial) dari fungsi $y = f(x)$ dinotasikan dengan $\frac{dy}{dx}$ atau y' atau $f'(x)$ dan didefinisikan sebagai:

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Persamaan (5-2) dikenal sebagai Hukum Faraday. Tanda minus pada persamaan tersebut menyatakan bahwa GGL atau arus induksi menghasilkan fluks induksi yang melawan perubahan fluks magnet asalnya (penyesuaian dengan hukum Lenz).

Selain nilai sesaat, GGL induksi juga sering dinyatakan dalam nilai rata-ratanya. Jika dalam selang waktu t terjadi perubahan fluks magnet sebesar $\Delta\Phi$, GGL induksi rata-rata pada kumparan memenuhi persamaan

$$\bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5-3)$$

Contoh 5.2

Sebuah kumparan terdiri atas 20 lilitan. Dalam selang waktu 5 milisekon, fluks magnet dalam kumparan berubah sebesar 3×10^{-3} weber. Tentukan GGL induksi rata-rata pada kumparan.

Jawab

Diketahui: $N = 20$, $t = 5 \text{ ms} = 5 \times 10^{-3} \text{ s}$, dan $\Delta\Phi = 3 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.
GGL induksi rata-ratanya adalah

$$\bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(20) \frac{(3 \times 10^{-3} \text{ Wb})}{(5 \times 10^{-3} \text{ s})} = -12 \text{ V}.$$

Contoh 5.3

Sebuah kumparan terdiri atas 50 lilitan berada dalam medan magnet yang arahnya sejajar dengan bidang kumparan. Besar medan magnet berubah terhadap waktu menurut persamaan $B = 10^{-3} \sin 100t$. Jika luas penampang kumparan 200 cm^2 dan hambatan dalam kumparan 4 ohm , tentukan:

- persamaan fluks magnet sebagai fungsi waktu,
- GGL induksi maksimum, dan
- arus induksi maksimum pada kumparan.

Jawab

Diketahui: $N = 50$, $B = 10^{-3} \sin 100t$, $A = 200 \text{ cm}^2 = 200 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, dan $R = 4 \text{ ohm}$.

- Medan magnet sejajar bidang kumparan berarti sudut antara B dan garis normal adalah $\theta = 0^\circ$ maka fluks magnet

$$\Phi = BA \cos \theta = (10^{-3} \sin 100t)(200 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(1) = 2 \times 10^{-5} \sin 100t \text{ Wb}.$$

- Dari hasil (a),

$$\frac{d\Phi}{dt} = (100)(2 \times 10^{-5} \sin 100t) = 2 \times 10^{-3} \sin 100t$$

sehingga GGL induksinya adalah

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -(50)(2 \times 10^{-3} \sin 100t) = -10 \sin 100t$$

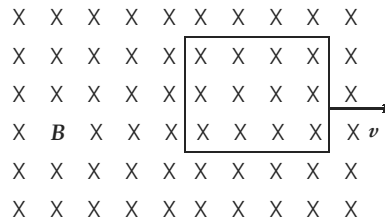
dan dari sini diperoleh GGL maksimumnya adalah $\varepsilon_{\text{maks}} = 10 \text{ V}$. (GGL maksimum diperoleh jika $\sin 100t = \pm 1$, ambil harga positifnya saja).

- Arus induksi maksimum adalah

$$i_{\text{maks}} = \frac{\varepsilon_{\text{maks}}}{R} = \frac{10 \text{ V}}{4 \text{ ohm}} = 2,5 \text{ A}.$$

Contoh 5.4

Sebuah persegi dengan sisi 5 cm terdiri atas 100 lilitan berada pada medan magnet seragam 0,8 tesla yang menembus tegak lurus bidang persegi, seperti diperlihatkan pada gambar di samping. Kumparan ditarik secara tiba-tiba keluar dari daerah bermedan magnet ke daerah tak bermedan magnet dan memerlukan waktu 0,2 sekon untuk melakukan hal tersebut.



- Tentukan GGL rata-rata yang timbul pada kumparan.
- Jika resistansi kumparan 50 ohm, berapakah daya yang diserap kumparan?

Jawab

Panjang sisi persegi 5 cm maka $A = (5 \times 5) \text{ cm}^2 = 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, medan magnet semula $B_o = 0,8 \text{ T}$, daerah tak bermedan magnet $B = 0$, $N = 100$ lilitan, $\Delta t = 0,2 \text{ s}$, dan $R = 50 \Omega$.

- Perubahan fluks magnet
 $\Delta \Phi = BA - B_o A = 0 - (0,8 \text{ T})(25 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = -20 \times 10^{-3} \text{ Wb}$
 maka GGL induksi rata-rata adalah

$$\bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(100) \frac{(-20 \times 10^{-3} \text{ Wb})}{(0,2 \text{ s})} = 1 \text{ V volt.}$$

- Arus listrik pada kumparan

$$i = \frac{\bar{\varepsilon}}{R} = \frac{1 \text{ V}}{50 \Omega} = 0,02 \text{ A}$$

sehingga daya yang diserap kumparan adalah

$$P = i^2 R = (0,02 \text{ A})^2 (50 \Omega) = 0,02 \text{ W} = 20 \text{ mW.}$$

Kata Kunci

- Arus induksi
- Eksperimen Faraday
- Fluks magnet
- GGL induksi
- Hukum Lenz
- Medan magnet

3. GGL Induksi pada Konduktor yang Bergerak dalam Medan Magnet Seragam

a. Konduktor Bergerak Lurus Tegak Lurus Medan Magnet

Perhatikan **Gambar 5.4(a)**. Sebuah konduktor PQ dapat bergerak bebas di atas atau menempel pada kawat berbentuk U yang berada pada medan magnet dengan arah menembus bidang kertas. Jika konduktor digerakkan dengan besar kecepatan v , dalam selang waktu Δt jarak yang ditempuhnya adalah

$$\Delta x = v \Delta t$$

Akibatnya, ada perubahan luas sebesar

$$\Delta A = l \Delta x = lv \Delta t$$

sehingga fluks magnet yang dilingkupi kawat U dan konduktor PQ berubah sebesar

$$\Delta \Phi = B \Delta A = Blv \Delta t$$

Sesuai dengan Hukum Faraday, pada penghantar PQ timbul GGL induksi rata-rata untuk ($N = 1$) sebesar

$$\bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{Blv \Delta t}{\Delta t} = -Blv$$

atau, ambil harga positifnya,

$$\boxed{\bar{\varepsilon} = Blv} \quad (5-4)$$

GGL induksi rata-rata ($\bar{\varepsilon}$) pada **Persamaan (5-4)** dapat diartikan sebagai beda potensial antara kedua ujung konduktor PQ. Kenyataan tersebut dapat diturunkan dari definisi beda potensial yang sudah dibahas pada Bab 4, yakni

Jangan Lupa

Jika $y = \sin f(x)$, turunannya adalah

$$\frac{dy}{dx} = [\cos f(x)] f'(x)$$

$$V = \frac{W}{q}$$

Sekarang, tinjau elektron-elektron pada konduktor PQ dengan muatan masing-masing q . Ketika konduktor PQ digerakkan ke kanan dengan kecepatan v memotong tegak lurus medan magnet (lihat **Gambar 5.4(b)**), berarti q bergerak dengan kecepatan dan arah yang sama. Akibatnya, elektron-elektron mendapatkan gaya ke bawah sebesar

$$F = Bqv$$

sehingga elektron-elektron akan terkumpul di Q dan meninggalkan muatan positif di P. Usaha untuk memindahkan muatan q dari Q ke P adalah

$$W = Fl = Bqvl$$

sehingga beda potensial antara titik P dan Q adalah

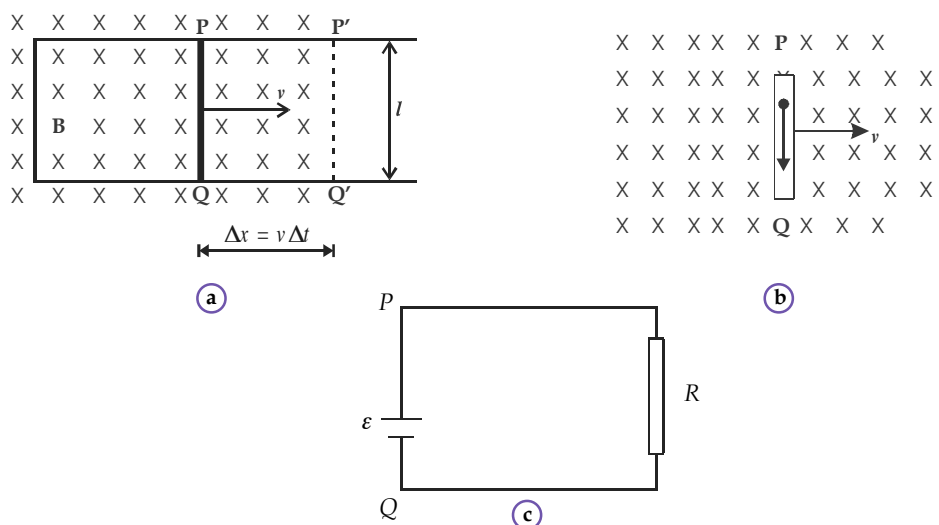
$$V_{PQ} = \frac{W}{q} = Blv$$

yang sama dengan **Persamaan (5-4)**. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa potensial titik P lebih tinggi daripada potensial titik Q.

Persamaan (5-4) tetap berlaku meskipun kawat U tidak dilibatkan. Dengan kata lain, ketika konduktor PQ digerakkan memotong medan magnet dengan kecepatan v , pada ujung-ujung konduktor akan terdapat beda potensial

$$V_{PQ} = Blv$$

Ketika konduktor PQ dihubungkan ke rangkaian luar berhambatan R , arus akan mengalir sebesar $\frac{V}{R}$ dari potensial tinggi ke potensial rendah atau dari P ke Q melalui R. Dalam hal ini, konduktor PQ dapat dipandang sebagai sumber tegangan dengan P sebagai kutub positif dan Q kutub negatif, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.4(c)**.



Gambar 5.4

Konduktor PQ bergerak memotong tegak lurus medan magnet:
(a) di atas kawat U dan, (b) tanpa kawat U, serta (c) dapat diartikan sebagai sumber tegangan yang dihubungkan dengan rangkaian luar.

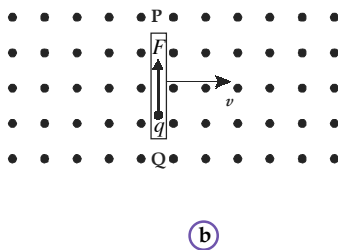
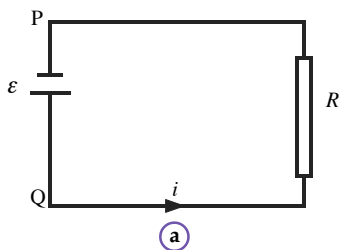
Contoh 5.5

Konduktor PQ dengan panjang 5 cm digerakkan memotong medan magnet 0,5 T dengan kecepatan 10 m/s seperti diperlihatkan pada gambar.

- Tentukan beda potensial antara kedua ujung konduktor.
- Jika ujung-ujung konduktor dihubungkan dengan resistansi $R = 10 \text{ ohm}$, berapakah arus yang mengalir melalui R ?
- Ke mana arah arus pada R ?

Jawab

Diketahui: $l = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$, $B = 0,5 \text{ T}$, $v = 10 \text{ m/s}$, dan $R = 10 \Omega$.



- Beda potensial antara kedua ujung konduktor adalah
 $V = \bar{\epsilon} = Blv = (0,50 \text{ T})(5 \times 10^{-2} \text{ m})(10 \text{ m/s}) = 0,25 \text{ V}$.
- Arus listrik pada resistor adalah
 $i = \frac{V}{R} = \frac{0,25 \text{ V}}{10 \Omega} = 0,025 \text{ A}$.
- Untuk menentukan arah arus pada R, terlebih dahulu Anda tentukan potensial mana yang lebih tinggi antara titik P dan titik Q. Untuk itu, tinjaulah elektron di dalam konduktor PQ. Ketika konduktor bergerak ke kanan, berarti elektron juga bergerak ke kanan. Oleh karena berada dalam medan magnet B , sesuai aturan tangan kanan, elektron akan mendapat gaya magnet F menuju P. Hal tersebut mengakibatkan elektron akan terkumpul di titik P dan meninggalkan muatan positif di titik Q. Dengan demikian, potensial di titik Q lebih tinggi dari potensial di titik P. Ketika dihubungkan dengan rangkaian luar R, arus listrik akan mengalir dari titik Q melalui R menuju titik P.

b. Konduktor Berputar dalam Medan Magnet

Selain dengan cara menggerakkan konduktor tegak lurus memotong medan magnet secara translasi, GGL induksi juga dapat terjadi dengan cara memutar konduktor tegak lurus medan magnet, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.5**. Konduktor PQ dengan panjang l diputar dengan sumbu putar melalui P. Jika kecepatan sudut putar konduktor ω , dalam satu periode

$$\Delta t = T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Luas daerah yang disapu konduktor sama dengan luas lingkaran, yakni

$$\Delta A = \pi l^2$$

Dengan demikian, perubahan fluks magnetnya adalah

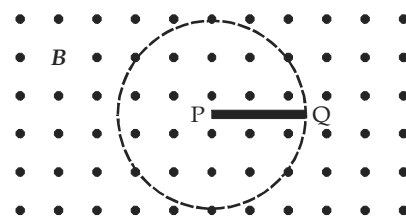
$$\Delta \Phi = B \Delta A = B \pi l^2$$

sehingga GGL rata-rata yang dihasilkan adalah

$$\bar{\epsilon} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{B \pi l^2}{T} = -\frac{B \pi l^2}{\frac{2\pi}{\omega}} = -\frac{1}{2} B \omega l^2$$

atau, ambil harga positifnya,

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} B \omega l^2$$



Gambar 5.5

Konduktor PQ berputar dalam medan magnet.

(5-5)

Jelajah Fisika

**Joseph Henry
(1797–1878)**



Joseph Henry dilahirkan pada 1798 di Albany, New York. Pada 1826, Henry memasuki kehidupan akademi sebagai profesor Matematika dan Fisika di Akademi Albany. Selain mengajar, Henry juga melakukan eksperimen tentang mesin elektromagnetik serta hubungan antara magnetisme dan listrik yang dikenal sebagai induksi.

Sumber: ieee-virtual-museum.org

Contoh 5.6

Pada **Gambar 5.5**, jika panjang konduktor 25 cm, kecepatan sudut 100 rad/s, dan medan magnet 0,32 T, tentukan beda potensial pada kedua ujung konduktor.

Jawab

Diketahui: $l = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$, $\omega = 100 \text{ rad/s}$, dan $B = 0,32 \text{ T}$.

Beda potensial antara kedua ujung konduktor adalah

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} B \omega l^2 = \frac{1}{2} (0,32 \text{ T}) (100 \text{ rad/s}) (0,25 \text{ m})^2 = 1 \text{ volt.}$$

4. Induktansi

a. Induktansi Diri

Pernahkah Anda memerhatikan bola lampu pijar sesaat setelah dimatikan melalui sakelar? Ternyata, pijar kawat wolfram tidak langsung mati, tetapi masih menyala merah sesaat dan kemudian baru benar-benar padam. Mengapa demikian? **Joseph Henry** (1797–1878) adalah orang yang telah menemukan jawaban dari pertanyaan tersebut. Joseph Henry dan Michael Faraday adalah dua orang yang secara terpisah telah menemukan adanya induksi elektromagnetik. Sebenarnya, Henry yang lebih dahulu menemukannya, tetapi penemuan Faraday telah lebih dahulu terpublikasikan.

Menurut Henry, perubahan arus listrik pada kumparan dapat menghasilkan GGL induksi diri pada kumparan tersebut. Pada kasus mematikan lampu pijar, kawat masih pijar, meskipun dengan intensitas kecil, akibat adanya GGL induksi diri. Besarnya GGL induksi diri sebanding dengan laju perubahan arus listrik dalam kumparan. Secara matematis, GGL induksi diri dinyatakan oleh persamaan

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt} \quad (5-6)$$

dengan: L = induktansi diri, dinyatakan dalam satuan henry (H), dan

$\frac{di}{dt}$ = laju perubahan arus listrik dalam satuan ampere per sekon (A/s).

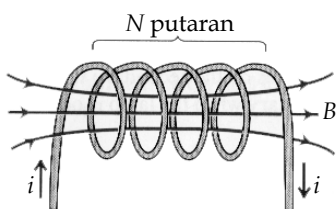
Persamaan (5-6) merupakan persamaan GGL sesaat. Adapun GGL induksi diri rata-rata dalam selang waktu Δt adalah

$$\bar{\varepsilon} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (5-7)$$

Persamaan (5-6) atau **(5-7)** disebut Hukum Henry.

Dalam kaitannya dengan Hukum Faraday, GGL induksi diri pada kumparan dapat dijelaskan dengan meninjau sebuah kumparan atau solenoida, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.6**. Ketika arus listrik pada solenoida berubah, medan magnet di dalam solenoida juga berubah. Akibatnya, fluks magnetnya pun berubah. Menurut Faraday, perubahan fluks magnet tersebut yang mengakibatkan munculnya GGL induksi diri pada solenoida. Dengan demikian, GGL induksi diri pada **Persamaan (5-6)** sama dengan GGL induksi yang dirumuskan oleh Faraday pada **Persamaan (5-2)**, yakni

$$-L \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt}$$



Gambar 5.6

Kumparan atau solenoida.

sehingga diperoleh hubungan

$$L = N \frac{d\Phi}{di} \quad (5-8)$$

Jika $\frac{d\Phi}{di}$ konstan, **Persamaan (5-8)** dapat ditulis sebagai berikut.

$$L = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta i} \quad (5-9)$$

Kata Kunci

- Induktansi
- Induktansi diri
- Induktansi silang

Kumparan yang memiliki induktansi diri disebut *induktor*. Induktor banyak dijumpai pada rangkaian arus bolak-balik dan rangkaian elektronik. Bersama kapasitor, induktor juga digunakan dalam rangkaian osilator LC untuk membangkitkan gelombang dengan frekuensi tertentu.

Contoh 5.7

Arus listrik pada kumparan berubah dari 2 A menjadi nol dalam waktu 5 ms. Jika induktansi diri kumparan 0,3 mH, tentukan GGL induksi diri pada kumparan tersebut.

Jawab

Diketahui: $\Delta i = (0 - 2) \text{ A} = -2 \text{ A}$, $\Delta t = 5 \text{ ms} = 5 \times 10^{-3} \text{ s}$, dan $L = 0,3 \text{ mH} = 0,3 \times 10^{-3} \text{ H}$. Nilai GGL induksi diri pada kumparan adalah

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -(0,3 \times 10^{-3}) \frac{(-2)}{(5 \times 10^{-3})} = 0,12 \text{ V}.$$

Contoh 5.8

Solenoida dengan N lilitan dan panjang l dialiri arus listrik i . Luas penampang solenoida adalah A . Tentukan induktansi diri solenoida tersebut. Nyatakan dalam N , A , dan l .

Jawab

Anggaplah medium di dalam sumbu solenoida adalah udara. Fluks magnet yang dilingkupi luas penampangnya adalah

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 NiA}{l}.$$

Turunan Φ terhadap i adalah

$$\frac{d\Phi}{di} = \frac{d}{di} \left(\frac{\mu_0 NiA}{l} \right) = \frac{\mu_0 NA}{l}$$

sehingga dari **Persamaan (5-8)** diperoleh induktansi diri solenoida memenuhi persamaan

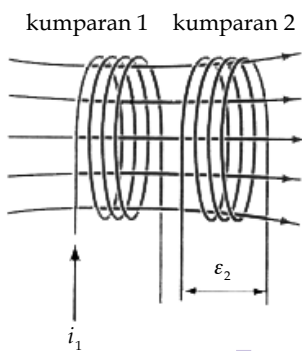
$$L = N \frac{d\Phi}{di} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

Contoh ini memperlihatkan bahwa induktansi diri dari kumparan (induktor) ditentukan oleh dimensi (ukuran) kumparan dan medium di dalamnya.

Jangan Lupa

Jika $y = cx^n$, dengan c dan n konstanta *real*, maka

$$\frac{dy}{dx} = cnx^{n-1}$$



Gambar 5.7

Dua kumparan yang berdekatan satu sama lain.

b. Induktansi Silang

Tinjau dua kumparan yang berdekatan satu sama lain, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.7**. Perubahan arus listrik pada kumparan pertama akan menginduksi GGL atau arus pada kumparan kedua yang juga berubah. Sebaliknya, perubahan arus pada kumparan kedua akan menginduksi GGL atau arus pada kumparan pertama. Sesuai dengan Hukum Henry, GGL induksi pada kumparan kedua akibat perubahan arus pada kumparan pertama adalah

$$\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (5-10)$$

Sedangkan GGL induksi pada kumparan pertama akibat perubahan arus pada kumparan kedua adalah

$$\varepsilon_1 = -M \frac{di_2}{dt} \quad (5-11)$$

Konstanta kesebandingan (M), disebut *induktansi silang*.

Contoh 5.9

Sebuah solenoida dengan panjang l terdiri atas N_1 lilitan dan memiliki luas penampang A . Solenoida tersebut berada di dalam kumparan lain yang terdiri atas N_2 lilitan. Anggap semua fluks magnet dari solenoida melewati kumparan. Tentukan induktansi silang sistem tersebut.

Jawab

Misalnya, solenoida dialiri arus i_1 yang berubah terhadap waktu. Fluks magnet yang dihasilkan solenoida adalah

$$\Phi_1 = BA = \frac{\mu_0 N_1 i_1 A}{l}$$

sehingga

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 N_1 i_1 A}{l} \right) = \frac{\mu_0 N_1 A}{l} \frac{di_1}{dt}$$

Fluks magnet tersebut melewati kumparan kedua sehingga pada kumparan kedua timbul GGL induksi

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -N_2 \frac{\mu_0 N_1 A}{l} \frac{di_1}{dt}$$

Persamaan ini juga dapat ditulis sesuai **Persamaan (5-10)**, $\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt}$, maka

$$-M_2 \frac{di_1}{dt} = -N_2 \frac{\mu_0 N_1 A}{l} \frac{di_1}{dt}$$

sehingga diperoleh induktansi silang

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{l}$$

c. Energi yang Tersimpan pada Induktor

Seperti halnya kapasitor, induktor berfungsi sebagai penyimpan energi. Energi tersimpan pada induktor dalam bentuk medan magnet. Ketika arus listrik i mengalir melalui induktor dan GGL induksi diri pada induktor tersebut besarnya

$$\varepsilon = L \frac{di}{dt}$$

maka laju energi yang tersimpan pada induktor adalah

$$\frac{dW}{dt} = \varepsilon i = Li \frac{di}{dt}$$

sehingga diperoleh

$$dW = Li di$$

Energi yang tersimpan di dalam induktor selama arus mengalir dari nol sampai harga konstan I diperoleh dengan cara mengintegrasikan kedua ruas dari persamaan tersebut.

$$W = \int_0^W dW = \int_0^I Li di = \left[\frac{1}{2} Li^2 \right]_0^I$$

sehingga diperoleh

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (5-12)$$

dengan W = energi yang tersimpan di dalam induktor (J).

Jangan Lupa

Integral adalah kebalikan turunan. Jika turunan suatu fungsi diintegrasikan, hasilnya fungsi semula. Integral

dinotasikan dengan $\int \dots dx$.

Jika $f'(x) = \frac{d}{dx}(f(x))$ maka

$$\int f'(x) dx = \int \frac{d}{dx}(f(x)) dx = f(x) + C$$

dengan C konstanta integral.

Contoh 5.10

Sebuah induktor dengan induktansi 0,25 mH dialiri arus listrik 20 A. Tentukan energi yang tersimpan dalam induktor tersebut.

Jawab

Diketahui: $L = 0,25 \text{ mH} = 0,25 \times 10^{-3} \text{ H}$ dan $I = 20 \text{ A}$.

Energi yang tersimpan dalam induktor adalah

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} (0,25 \times 10^{-3} \text{ H})(20 \text{ A})^2 = 5 \times 10^{-2} \text{ J}.$$

Soal Penguasaan Materi 5.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah kumparan berada dalam medan magnet. Arah medan magnet menembus tegak lurus bidang kumparan.
 - Apakah arus induksi muncul ketika kumparan digerakkan sejajar medan magnet?
 - Jika kumparan diputar, apakah muncul arus induksi?

Tuliskan alasan untuk kedua jawaban pertanyaan tersebut.
- Fluks magnet pada kumparan dengan 25 lilitan berubah dari 10^{-3} weber menjadi nol dalam waktu 10 milisekon.
 - Berapakah GGL induksi yang timbul pada kumparan?
 - Tentukan arus pada kumparan jika hambatanya 4 ohm.
- Sebuah konduktor dengan panjang 30 cm diputar memotong tegak lurus medan magnet dengan poros melalui salah satu ujungnya. Antara kedua ujung konduktor terdapat beda potensial 3 volt. Jika besar medan magnet 0,2 T, tentukan jumlah putaran konduktor tiap menit.
- Sebuah cincin kawat dengan diameter 30 cm berada dalam medan magnet seperti pada gambar berikut.

Jika medan magnet berubah dari 0,5 T menjadi 0,1T dalam waktu 15 ms, tentukan:

 - GGL induksi rata-rata dan
 - arah arus induksi pada cincin.
- Solenoida dengan panjang 50 cm, terdiri atas 20 lilitan, dan luas penampang $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ dialiri arus 4 A.
 - Tentukan induktansi solenoida.
 - Berapakah GGL induksi diri pada solenoida jika arus listriknya menjadi nol dalam waktu 3 ms?
 - Berapakah energi yang tersimpan pada solenoida?



B Beberapa Aplikasi Induksi Elektromagnetik

Jangan Lupa

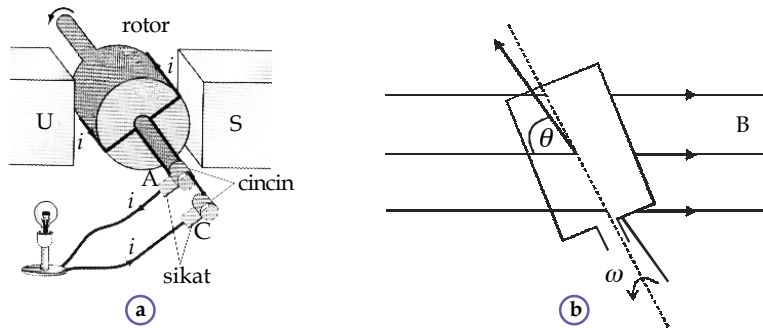
Motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gerak rotasi).

1. Generator Arus Listrik

Hingga saat ini, Penemuan Faraday telah memberikan perubahan yang signifikan pada kehidupan manusia, misalnya dengan adanya generator arus listrik atau dinamo. Dengan adanya generator, keperluan akan energi listrik menjadi terpenuhi. Apalagi, energi listrik merupakan energi yang sangat mudah diubah menjadi energi lain.

Generator arus listrik mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya merupakan kebalikan dari motor listrik, yang sudah Anda pelajari di Bab 4. **Gambar 5.8(a)** memperlihatkan diagram sederhana dari generator arus listrik bolak-balik. Rotor atau armatur berupa silinder dililit oleh kawat dan berada di dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet tetap U-S. Setiap ujung kawat dihubungkan ke sebuah cincin luncur yang terpisah. Setiap cincin berhubungan dengan sikat-sikat yang berfungsi sebagai penghubung ke rangkaian luar, misalnya lampu.

Sumbu rotor biasanya dihubungkan dengan turbin. Turbin digerakkan oleh air terjun atau air yang memancar dari bendungan, seperti pada PLTA. Ketika rotor berputar, GGL atau arus induksi muncul pada kumparan. Setiap setengah putaran, arus listrik pada kumparan berbalik arah, dan arus seperti ini disebut arus bolak balik atau arus AC (*alternating current*).



Gambar 5.8

(a) Generator arus listrik.
(b) Kumparan diputar dalam medan magnet dan dalam waktu t menempuh $\theta = \omega t$.

Sekarang, tinjaulah **Gambar 5.8(b)**. Misalnya, rotor diputar dengan kecepatan sudut ω . Dalam waktu t , sudut antara garis normal kumparan dan medan magnet adalah $\theta = \omega t$. Fluks magnet yang dilingkupi kumparan dengan luas A memenuhi persamaan

$$\Phi = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

GGL induksi sesaat yang dihasilkannya adalah

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \omega t) = -N (-BA \omega \sin \omega t) = NBA \omega \sin \omega t$$

atau

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (5-13)$$

dengan ε_m adalah GGL induksi maksimum yang memenuhi persamaan

$$\varepsilon_m = NBA \omega \quad (5-14)$$

Persamaan (5-13) menunjukkan bahwa generator menghasilkan GGL yang berubah secara sinusoida. Grafik GGL terhadap waktu diperlihatkan pada **Gambar 5.9**. Seperti pada gelombang, kecepatan sudut dapat dinyatakan oleh

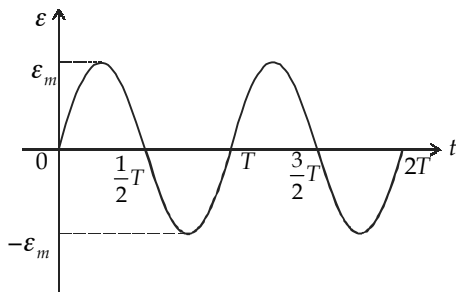
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Kata Kunci

- Efisiensi trafo
- Generator arus listrik
- Kumparan primer
- Mikrofon
- Rem magnet
- Tape recorder
- Trafo (transformator)
- Trafo step-down
- Trafo step-up

dengan: f = frekuensi, dan
 T = periode.

Dapat dilihat dari **Gambar 5.9** bahwa setiap setengah periode (setengah gelombang), GGL berubah dari positif ke negatif atau sebaliknya.



Gambar 5.9

Grafik GGL yang dihasilkan generator terhadap waktu.

Selain arus bolak-balik, arus searah juga dapat dibangkitkan oleh generator. Generator pembangkit arus searah disebut generator DC (*direct current*). Generator DC tidak berbeda dengan generator AC, kecuali cincin luncurnya yang diganti oleh cincin belah yang disebut *komutator*.

Contoh 5.11

Rotor generator diputar dengan frekuensi 50 Hz dalam medan magnet 0,15 T. Jika luas kumparan $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ dan generator membangkitkan GGL maksimum 220 V, berapakah jumlah lilitan kumparan?

Jawab

Diketahui: $f = 50 \text{ Hz}$, $B = 0,15 \text{ T}$, $A = 2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, dan $m = 220 \text{ V}$

Kecepatan sudutnya adalah

$$\omega = 2\pi f = (6,28)(50 \text{ Hz}) = 314 \text{ rad/s.}$$

Dari Persamaan (5-14) diperoleh

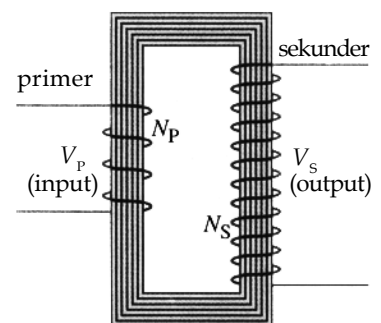
$$N = \frac{\epsilon_m}{BA\omega} = \frac{220 \text{ V}}{(0,15 \text{ T})(2 \times 10^{-2} \text{ m}^2)(314 \text{ rad/s})} = 234 \text{ lilitan.}$$

2. Transformator

Selain generator, alat yang bekerja berdasarkan prinsip Faraday adalah *transformator* atau *trafo*. Trafo adalah alat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik bolak-balik. Trafo banyak ditemukan pada peralatan elektrik dan elektronik, seperti televisi, *tape recorder*, radio, adaptor, dan sistem transmisi tegangan listrik.

Sebuah trafo terdiri atas dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder, dengan inti besi di dalamnya, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.10**. Kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan listrik bolak-balik, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan ke peralatan listrik lainnya, misalnya televisi dan radio. Letak kumparan primer dan sekunder sedemikian sehingga perubahan fluks magnet pada kumparan primer dapat melintasi kumparan sekunder.

Prinsip kerja trafo sebagai berikut. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, arus listrik bolak-balik mengalir melalui kumparan primer. Oleh karena arus bolak-balik berubah secara sinusoida, fluks magnet yang dihasilkannya juga berubah secara sinusoida.

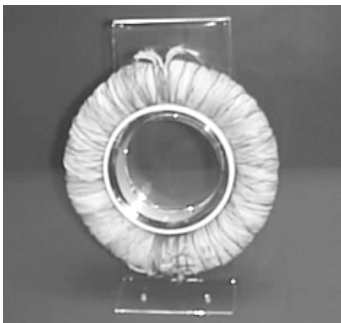


Gambar 5.10

Skema sederhana transformator atau trafo.

Jelajah Fisika

Cincin Faraday



Sumber: www.sci-museum.jp

Cincin besi lunak yang digulungkan dengan kumparan dari kawat tembaga dan dipisahkan oleh benang ikat dan kain belacu ini digunakan Faraday pada penemuannya tentang induksi elektromagnetik. Faraday menemukan bahwa arus listrik pada kumparan pertama menimbulkan arus listrik pada kumparan kedua meskipun kawat-kawatnya tidak bersentuhan. Cincin tersebut merupakan transformator pertama meskipun tidak difungsikan sebagai transformator karena Faraday tidak menggunakan arus bolak-balik, melainkan arus searah yang bersumber dari baterai.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Fluks magnet tersebut menginduksi kumparan sekunder sehingga pada kumparan sekunder timbul tegangan atau arus yang juga berubah secara sinusoida. Sesuai dengan Hukum Faraday, GGL atau tegangan induksi pada kumparan sekunder adalah

$$V_s = N_s \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (5-15)$$

dengan: N_s = jumlah lilitan kumparan sekunder, dan

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \text{laju perubahan fluks magnet pada kumparan sekunder.}$$

Tegangan primer juga berkaitan dengan perubahan fluks magnet yang dinyatakan dengan persamaan

$$V_p = N_p \frac{d\Phi_p}{dt} \quad (5-16)$$

dengan: N_p = jumlah lilitan kumparan primer, dan

$$\frac{d\Phi_p}{dt} = \text{laju perubahan fluks magnet pada kumparan primer.}$$

Anggaplah tidak ada fluks yang hilang maka

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{d\Phi_p}{dt}$$

sehingga diperoleh perbandingan tegangan kedua kumparan adalah

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (5-17)$$

Persamaan (5-17) disebut persamaan trafo. Persamaan tersebut memperlihatkan bahwa naik atau turunnya tegangan bergantung pada perbandingan antara jumlah lilitan primer dan sekunder. Jika jumlah lilitan sekunder lebih besar daripada jumlah lilitan primer ($N_s > N_p$), tegangan sekunder lebih besar daripada tegangan primer ($V_s > V_p$). Trafo demikian disebut *trafo step-up* (penaik tegangan). Sebaliknya, jika jumlah lilitan sekunder lebih kecil daripada jumlah lilitan primer ($N_s < N_p$), tegangan sekunder pun lebih kecil daripada tegangan primer ($V_s < V_p$). Trafo demikian disebut *trafo step-down* (penurun tegangan).

Ketika trafo bekerja, energi atau daya dari kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder. Akan tetapi, tidak semua daya dari kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder karena selalu ada energi yang “hilang” atau berubah bentuk menjadi energi lain, misalnya panas. Oleh karena itu, daya pada kumparan sekunder selalu lebih kecil daripada daya pada kumparan primer. Perbandingan antara daya pada kumparan primer (P_p) dan daya pada kumparan sekunder (P_s) disebut *efisiensi trafo*. Secara matematis, efisiensi trafo dinyatakan oleh persamaan

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% \quad (5-18)$$

dengan η = efisiensi trafo, dinyatakan dalam persen (%).

Daya primer dan sekunder masing-masing dapat dinyatakan oleh persamaan

$$P_p = V_p I_p \quad \text{dan} \quad P_s = V_s I_s \quad (5-19)$$

dengan I_p dan I_s masing-masing arus pada kumparan primer dan sekunder.

Trafo yang dirancang dengan baik dapat mencapai efisiensi lebih dari 99%. Dengan kata lain, sangat sedikit energi yang diubah menjadi panas. Trafo dengan efisiensi sebesar ini dikatakan mendekati ideal (100%) atau $P_s \approx P_p$.

Contoh 5.12

Sebuah trafo memiliki perbandingan jumlah lilitan kumparan primer dan sekunder 11 : 1. Bagian input trafo dihubungkan ke sumber tegangan listrik dari PLN sebesar 220 V. Arus output (sekunder) adalah 2,2 A.

- Tentukan tegangan output trafo.
- Jika trafo dianggap ideal, berapa arus inputnya?

Jawab

Diketahui: $N_p : N_s = 11 : 1$, $V_p = 220 \text{ V}$, dan $I_s = 2,2 \text{ A}$.

- Dari **Persamaan (5-17)**, tegangan output (sekunder) trafo adalah

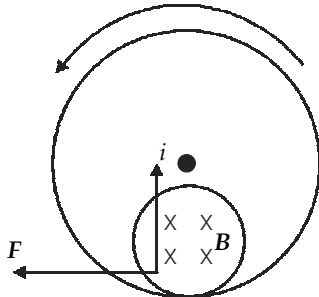
$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p = \frac{1}{11} (220 \text{ V}) = 20 \text{ V}.$$

- Trafo ideal maka $P_s = P_p$ atau $V_p I_p = V_s I_s$ sehingga diperoleh

$$I_p = \frac{V_s I_s}{V_p} = \frac{(20 \text{ V})(2,2 \text{ A})}{(220 \text{ V})} = 0,02 \text{ A}.$$

3. Rem Magnet

Arus induksi tidak hanya terjadi pada kawat atau kumparan. Tinjaulah sebuah piringan logam yang berputar berlawanan arah putaran jarum jam seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.11**.



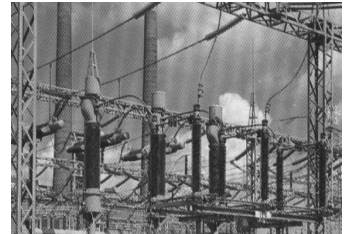
Sebagian dari piringan berada dalam medan magnet dengan arah masuk bidang ($\times$). Bagian dari piringan yang berada dalam medan magnet akan menghasilkan GGL induksi (ingat, konduktor yang bergerak dalam medan magnet). Arah arus induksi pada bagian yang berada dalam medan magnet adalah ke atas (Hukum Lenz) dan ke bawah pada bagian yang berada di luar medan magnet. Dengan menggunakan aturan tangan kanan, gaya pada bagian arus dalam medan magnet pada piringan berlawanan dengan arah gerak piringan. Akibatnya, gerak piringan menjadi diperlambat. Inilah prinsip kerja rem magnet.

4. Mikrofon

Mikrofon adalah alat yang mengubah energi bunyi menjadi energi listrik. Kumparan ringan ditempelkan pada membran yang berada dekat magnet tetap, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.12**. Ketika seseorang berbicara menggunakan mikrofon tersebut, gelombang bunyi akan menggetarkan

Jelajah Fisika

Transformator dalam Industri

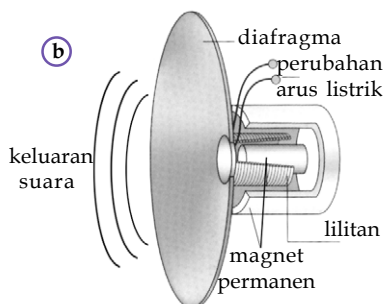
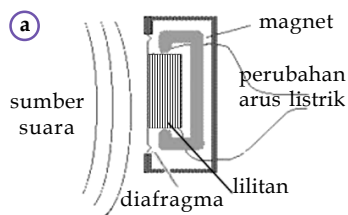


Generator pada pusat pembangkit listrik modern tidak menghasilkan listrik pada tegangan tinggi yang mencukupi untuk transmisi yang efisien. Tegangan dinaikkan dengan transformator step-up supaya transmisi jarak jauh menjadi efisien.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Gambar 5.11

Prinsip kerja rem magnet.



Gambar 5.12

(a) Mikrofon
(b) pengeras suara (loudspeaker)

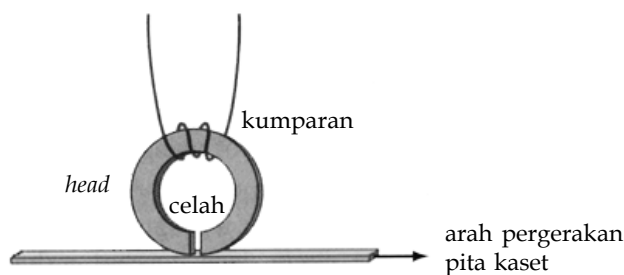
Gambar 5.13

Proses merekam suara atau memainkan kaset.

membran dan sekaligus kumparan. Gerakan kumparan dalam medan magnet (dari magnet tetap) akan menghasilkan arus induksi pada kumparan. Frekuensi dari arus induksi yang dihasilkan sama dengan frekuensi bunyi yang menggetarkan membran. Arus induksi tersebut akan diperkuat oleh penguat, kemudian dikirim ke pengeras suara yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi bunyi (kebalikan dari mikrofon).

5. Tape Recorder

Proses merekam suara ke dalam pita kaset dan memainkan kaset pada *tape recorder* dilakukan oleh *head*. *Tape recorder* mengandung lapisan tipis oksida magnetik dalam plastik tipis. Ketika merekam suara ke dalam pita kaset, *head* bertindak sebagai elektromagnet tipis yang memagnetkan bagian dari pita kaset yang melewati celah sempit dalam *head*. Ketika kaset dimainkan, perubahan kemagnetan pada pita kaset dan celah menyebabkan perubahan medan magnet dalam *head*. Perubahan medan magnet tersebut menimbulkan GGL induksi pada kumparan. GGL induksi tersebut merupakan sinyal output dari *head* dan diperkuat oleh penguat sebelum akhirnya dikirimkan ke pengeras suara.



Soal Penguasaan Materi 5.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- GGL maksimum yang dihasilkan generator pada 2.000 putaran per menit adalah 220 V. Berapakah GGL maksimum yang dihasilkan generator tersebut pada 1.000 putaran per menit?
- Tuliskan hal-hal yang dapat Anda lakukan agar GGL maksimum yang dihasilkan generator meningkat menjadi dua kali semula.
- Perbandingan jumlah lilitan kumparan primer dan sekunder sebuah trafo adalah 10 : 1. Kumparan primer trafo dihubungkan dengan sumber tegangan 220 V dengan arus 0,5 A.
 - Berapakah tegangan output trafo?
 - Jika arus outputnya 2,5 A, berapakah efisiensi trafo?
- Trafo dengan efisiensi 80% digunakan untuk menyalakan 10 buah lampu 12 V, 40 W yang dipasang paralel. Perbandingan jumlah lilitannya adalah 20 : 1. Tentukanlah:
 - daya,
 - tegangan, dan
 - arus pada kumparan primer.

C Persamaan Arus Listrik Bolak-Balik

Telah Anda ketahui pada pembahasan sebelumnya bahwa arus listrik bolak-balik dibangkitkan oleh generator AC. Tegangan listrik bolak-balik berubah terhadap waktu secara sinusoida yang secara matematis dituliskan pada **Persamaan (5-13)**. Untuk selanjutnya, tanpa mengubah makna, **Persamaan (5-13)** akan ditulis dalam bentuk sebagai berikut.

$$V = V_m \sin \omega t \quad (5-20)$$

dengan: V = tegangan sesaat (V),
 V_m = tegangan maksimum/puncak (V),
 $\omega = 2\pi f$ = frekuensi sudut (rad/s),
 T = periode (s),
 f = frekuensi (Hz), dan
 t = waktu (s).

Besaran t disebut sudut fase (rad). **Persamaan (5-20)** menunjukkan bahwa nilai tegangan bolak-balik bervariasi dari $-V_m$ sampai dengan $+V_m$.

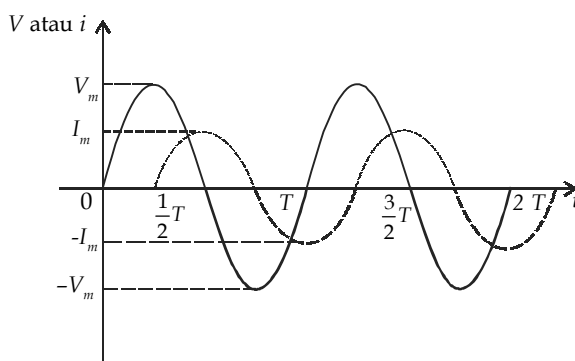
Ketika sumber tegangan dihubungkan dengan rangkaian luar, arus listrik bolak-balik akan mengalir pada rangkaian. Secara umum, persamaan arus listrik dapat dinyatakan oleh

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5-21)$$

dengan: i = arus sesaat (A),
 I_m = arus maksimum/puncak, dan
 φ = sudut fase antara arus dan tegangan.

Seperti halnya tegangan, nilai arus listrik pun bervariasi dari $-I_m$ sampai dengan $+I_m$.

Grafik tegangan dan arus bolak-balik diperlihatkan pada **Gambar 5.14** berikut ini.



Gambar 5.14

Tegangan dan arus listrik bolak-balik terhadap waktu.

1. Nilai rms atau Efektif

Gambar 5.14 memperlihatkan bahwa dalam setiap setengah periode, nilai arus (atau tegangan) listrik berubah tanda dari positif ke negatif atau sebaliknya. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika tegangan diberikan pada sebuah resistor, arus pada resistor bergerak bolak-balik. Arus tersebut akan menyebabkan resistor menjadi panas. Daya yang diubah menjadi panas pada hambatan R adalah

$$P = i^2 R = I_m^2 R \sin^2(\omega t + \varphi) \quad (5-22)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan arus bolak-balik selalu positif dan nilainya berubah dari nol sampai dengan $I_m^2 R$ (ingat: $0 \leq \sin^2 \theta \leq 1$). Daya rata-ratanya adalah

$$\overline{P} = \frac{0 + I_m^2 R}{2} = \frac{I_m^2 R}{2} = \overline{I^2} R \quad (5-23)$$

dengan $\overline{I^2}$ adalah nilai rata-rata kuadrat arus dan memenuhi persamaan

$$\overline{I^2} = \frac{I_m^2}{2} \quad (5-24)$$

Solusi Cerdas

Sebuah transformator dengan tegangan primer 110 volt dan tegangan sekunder 220 volt mempunyai efisiensi 80%. Jika arus pada kumparan primer 5 A, arus sekundernya adalah

- a. 0,5 A d. 8 A
b. 2 A e. 10 A
c. 4 A

Penyelesaian

Diketahui: $V_p = 110$ volt,
 $V_s = 220$ volt,
 $\eta = 80\%$, dan
 $I_p = 5$ A.

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\%$$

$$80\% = \frac{V_s I_s}{V_p I_p} \times 100\%$$

$$0,8 (V_p I_p) = V_s I_s$$

$$0,8 (110)(5) = (220) I_s$$

$$I_s = 0,4 (5)$$

$$I_s = 2 \text{ A}$$

Jawab: b

Ebtanas 2004

Akar dari nilai rata-rata kuadrat arus disebut *nilai rms (root-mean-square)* atau *nilai efektif*. Dengan demikian, nilai arus efektif memenuhi persamaan

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (5-25)$$

Ketika hambatan R dilalui arus bolak-balik dengan arus efektif I_{ef} , tegangan efektif pada hambatan tersebut adalah

$$V_{ef} = I_{ef} R$$

Jika **Persamaan (5-25)** dimasukkan ke dalam persamaan $V_{ef} = I_{ef} R$ diperoleh hubungan antara tegangan efektif dengan tegangan maksimum yang mirip dengan **Persamaan (5-25)**, yakni

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (5-26)$$

Nilai efektif ini sangat berguna karena dapat langsung digunakan untuk menghitung daya melalui persamaan

$$P = i^2 R$$

Arus atau tegangan searah yang sama dengan arus atau tegangan efektif akan menghasilkan daya yang sama ketika dilewatkan pada hambatan yang sama. Jadi, nilai arus atau tegangan efektif adalah nilai arus atau tegangan bolak-balik yang menghasilkan daya yang sama dengan daya yang dihasilkan arus atau tegangan searah ketika dilewatkan pada hambatan yang sama.

2. Nilai Rata-Rata

Gambar 5.15 juga memperlihatkan metode untuk menentukan arus rata-rata. Secara matematis, arus rata-rata ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{2}{T} \int_0^{\frac{1}{2}T} i dt \\ &= \frac{2}{T} \int_0^{\frac{1}{2}T} I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt \\ &= -\frac{2}{T} \left[\frac{I_m T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]_0^{\frac{1}{2}T} \\ &= -\frac{I_m}{\pi} [\cos 2\pi - \cos 0] \\ &= -\frac{I_m}{\pi} [(-1) - (1)] \end{aligned}$$

sehingga diperoleh

$$\bar{I} = \frac{2I_m}{\pi} \quad (5-27)$$

Dari definisi arus sesaat,

$$i = \frac{dQ}{dt},$$

muatan dapat dicari dengan pengintegralan, yakni

$$Q = \int i dt$$

Kata Kunci

- Arus listrik bolak-balik
- Fasor
- Nilai rata-rata
- Nilai rms (efektif)
- Tegangan listrik bolak-balik

Dengan demikian,

$$\bar{I} = \frac{2}{T} \int i dt = \frac{2}{T} Q \text{ atau } \bar{I} \times \frac{T}{2} = Q$$

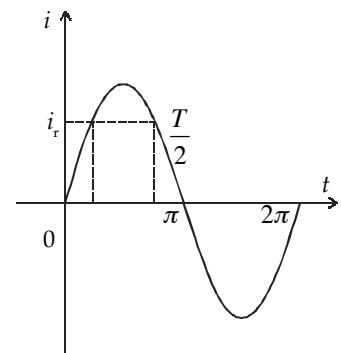
Arus searah I yang mengalir selama $\frac{1}{2}T$ akan menghasilkan muatan

$$Q = I \frac{T}{2}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa arus rata-rata adalah arus bolak-balik yang menghasilkan muatan yang sama dengan muatan yang dihasilkan arus searah dalam waktu yang sama.

Dengan cara yang sama dapat diperoleh tegangan rata-rata sebagai berikut.

$$\bar{V} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5-28)$$



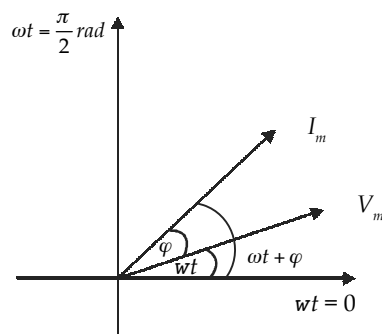
Gambar 5.15
Menentukan arus rata-rata.

3. Fasor

Fasor berasal dari kata *phasor*, singkatan dari *phase vector*, artinya vektor fase. Sebuah fasor memiliki sifat yang sama dengan vektor, memiliki nilai dan arah. Setiap gelombang sinusoida dapat digambarkan oleh sebuah fasor. Besar fasor sama dengan amplitudo gelombang, sedangkan sudut antara fasor dan sumbu- x positif sama dengan sudut fasenya. Sebagai contoh, persamaan tegangan dan arus bolak-balik dinyatakan oleh

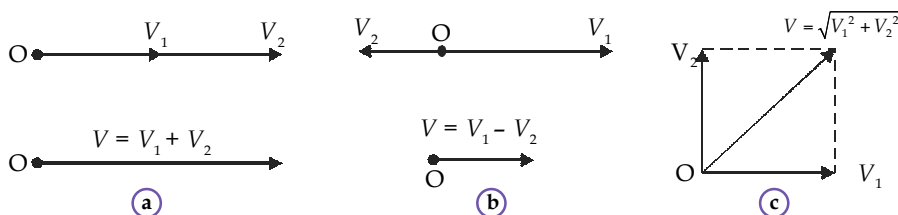
$$V = V_m \sin \omega t \text{ dan } I = I_m (\sin \omega t + \varphi)$$

Fasor tegangan dan arus adalah seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.16**. Perhatikan bahwa beda fase (φ) antara arus dan tegangan sama dengan sudut yang dibentuk oleh fasor arus dan fasor tegangan.

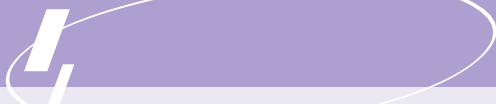


Gambar 5.16
Menggambar fasor tegangan dan arus.

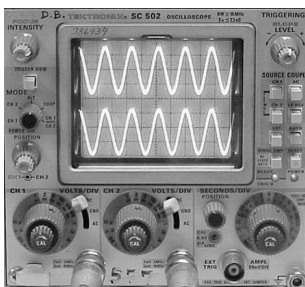
Oleh karena sifat fasor sama dengan sifat vektor, menjumlahkan dua buah fasor sama dengan meresultankan dua buah vektor (lihat **Gambar 5.17**). Jika dua fasor sejenis searah, resultannya sama dengan jumlah panjang kedua fasor. Jika berlawanan arah, resultan kedua fasor sama dengan selisih panjang kedua fasor. Jika kedua fasor saling tegak lurus, resultannya dapat dicari dengan menggunakan dalil Pythagoras.



Gambar 5.17
Menjumlahkan fasor sejenis yang:
(a) searah,
(b) berlawanan arah, dan
(c) saling tegak lurus.



4. Alat Ukur



Sumber: www.barrytech.com

Gambar 5.18

Osiloskop sebagai alat pengukur arus listrik dan tegangan listrik.

Arus dan tegangan listrik bolak-balik masing-masing dapat diukur menggunakan amperemeter dan voltmeter AC. Amperemeter dan voltmeter AC hanya mengukur nilai efektifnya. Sebagai contoh, jarum amperemeter AC menunjukkan angka 20 A. Ini berarti, arus efektifnya 20A atau arus maksimumnya $20\sqrt{2}$ A. Demikian pula, ketika jarum voltmeter AC menunjukkan angka 220 V, berarti tegangan efektifnya 220 V atau tegangan maksimumnya $220\sqrt{2}$ V.

Selain amperemeter AC dan voltmeter AC, arus dan tegangan listrik bolak-balik dapat diukur menggunakan osiloskop. **Gambar 5.18** memperlihatkan sebuah osiloskop. Ketika digunakan untuk mengukur arus atau tegangan listrik bolak-balik, layar osiloskop akan memperlihatkan tampilan gelombang arus atau tegangan. Dengan memperhatikan skala yang dapat diatur pada panel depan osiloskop, Anda dapat menentukan nilai arus atau tegangan maksimum dan periodenya. Cara menentukan besaran-besaran tersebut telah dipelajari di Kelas X.

Contoh 5.13

Arus bolak-balik mengalir pada penghantar memenuhi persamaan $i = 20 \sin 100\pi t$ dengan i dalam ampere dan t dalam sekon. Tentukan:

- arus maksimum,
- arus efektif,
- arus rata-rata, dan
- frekuensinya.

Jawab

- Bandingkan persamaan $i = 20 \sin 100\pi t$ dan $i = I_m \sin \omega t$ maka arus maksimumnya adalah $I_m = 20$ A.
- Arus efektifnya adalah

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{20 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 10\sqrt{2} \text{ A.}$$

- Arus rata-ratanya adalah

$$\bar{I} = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{(2)(20 \text{ A})}{\pi} = \frac{40}{\pi} \text{ A.}$$

- Hasil perbandingan pada (a) juga diperoleh $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ maka frekuensi arusnya adalah

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ Hz.}$$

Soal Penguasaan Materi 5.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Generator AC membangkitkan GGL bolak-balik dengan persamaan $V = 120\sqrt{2} \sin 120 \pi t$ dengan V dalam volt dan t dalam sekon. Tentukan:
 - tegangan efektif dan rata-rata,
 - frekuensi dan periode tegangan, dan
 - tegangannya saat $t = \frac{1}{240}$ sekon.
- Dua buah sumber tegangan bolak-balik menghasilkan tegangan masing-masing memenuhi persamaan

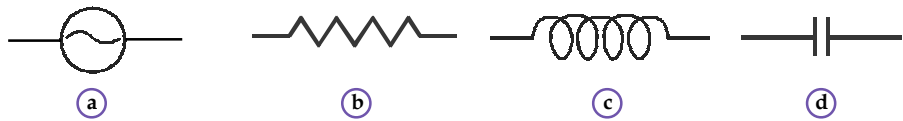
$$V_1 = 60 \sin \omega t \text{ dan } V_2 = 80 \sin \left(\omega t + \frac{1}{2}\pi \right)$$

dengan V dalam volt dan t dalam sekon.

- Gambarkan fasor V_1 dan V_2 dengan titik tangkap di titik (0,0) pada koordinat kartesius.
- Berapa sudut yang dibentuk oleh kedua fasor (beda sudut fase) tersebut?
- Jika kedua fasor itu dijumlahkan, berapa panjang resultannya?

D **Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian Arus Bolak-balik**

Resistor, induktor, dan kapasitor dapat dirangkakan dengan generator AC (sumber tegangan). Simbol masing-masing komponen dalam rangkaian listrik AC diperlihatkan pada **Gambar 5.19**.



Gambar 5.19
Simbol-simbol dalam rangkaian AC:
(a) generator,
(b) resistor,
(c) induktor, dan
(d) kapasitor.

1. Resistor dalam Rangkaian AC

Ketika sebuah resistor dihubungkan dengan sumber tegangan (generator) bolak-balik, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.20(a)**, arus listrik akan mengalir melalui resistor. Tegangan pada resistor sama dengan tegangan sumber, yaitu

$$V_R = V_m \sin \omega t$$

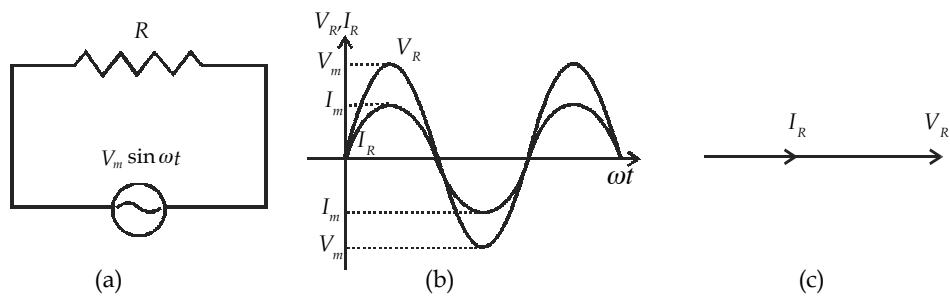
(5-29)

Sesuai dengan Hukum Ohm, arus yang mengalir melalui resistor adalah

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

(5-30)

Persamaan (5-29) dan (5-30) menunjukkan bahwa tegangan dan arus pada resistor memiliki sudut fase yang sama, yakni ωt . Grafik tegangan dan arus terhadap waktu diperlihatkan pada **Gambar 5.20(b)**. Sementara itu, fasor tegangan dan arus pada resistor diperlihatkan pada **Gambar 5.20(c)**. Fasor tegangan dan arus pada resistor berimpit karena arus dan tegangan sefase (memiliki sudut fase yang sama).



Gambar 5.20
(a) Rangkaian resistor dan sumber tegangan AC.
(b) Grafik tegangan dan arus terhadap waktu.
(c) Diagram fasor tegangan dan arus pada resistor.

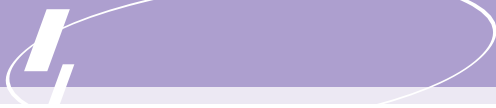
2. Induktor dalam Rangkaian AC

Gambar 5.21(a) memperlihatkan induktor yang dihubungkan ke sumber tegangan AC. Arus yang mengalir pada induktor akan menimbulkan GGL induksi pada induktor yang berlawanan dengan sumbernya. Dengan menerapkan Hukum Kirchhoff tentang tegangan pada loop, diperoleh bahwa tegangan pada induktor sama dengan tegangan sumber, yakni

$$V_L = V_m \sin \omega t$$

(5-31)

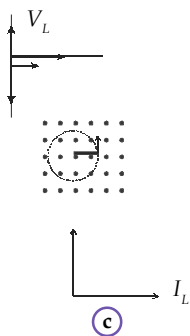
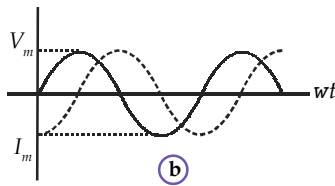
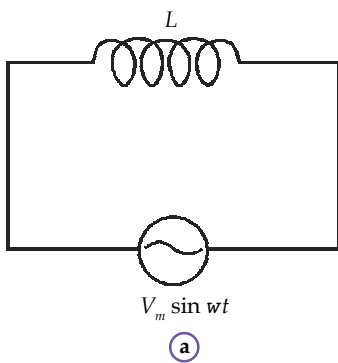
Selanjutnya, karena $V_L = L \frac{di}{dt}$ maka



Jangan Lupa

Salah satu rumus berelasi dalam trigonometri:

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \sin(90^\circ - \alpha) \\ &= -\sin(-90^\circ + \alpha) \\ &= -\sin(\alpha - 90^\circ) \\ &= -\sin\left(\alpha - \frac{1}{2}\pi\right)\end{aligned}$$



Gambar 5.21

- (a) Rangkaian induktor dan sumber tegangan AC.
(b) Grafik tegangan dan arus terhadap waktu.
(c) Diagram fasor tegangan dan arus pada induktor.

$$L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t$$

atau

$$di = \frac{V_m}{L} \sin \omega t dt$$

Arus listrik diperoleh melalui pengintegralan sebagai berikut.

$$I_L = \int di = \frac{V_m}{L} \int \sin \omega t dt = \frac{V_m}{L} \left[-\frac{1}{\omega} \cos \omega t \right] = -\frac{V_m}{\omega L} \cos \omega t$$

Dari trigonometri pada matematika, $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi)$ sehingga diperoleh

$$I_L = \frac{V_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \text{ atau } I_L = I_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \quad (5-32)$$

dengan

$$I_m = \frac{V_m}{\omega L}$$

Perbandingan antara tegangan dan arus pada induktor disebut *reaktansi induktif*, yakni

$$X_L = \frac{V_m}{I_m} = \omega L \quad (5-33)$$

Satuan dari reaktansi induktif sama dengan satuan resistor, yakni ohm (Ω).

Persamaan (5-31) dan **(5-32)** memperlihatkan bahwa antara tegangan dan arus terdapat perbedaan fase $\frac{1}{2}$ rad. Grafik arus terhadap waktu dan tegangan terhadap waktu diperlihatkan pada **Gambar 5.21(b)**. Sementara itu, diagram fasor tegangan dan arus diperlihatkan pada **Gambar 5.21(c)**. Dari diagram fasor terlihat bahwa, pada induktor, arus tertinggal oleh tegangan dengan beda sudut fase $\frac{1}{2}$ rad.

Persamaan (5-33) diperoleh dengan menganggap induktor sebagai induktor murni, yakni induktor yang tidak memiliki resistansi. Pada kenyataannya, induktor dapat memiliki resistansi. Ketika resistansi tersebut cukup besar (tidak dapat diabaikan), resistansi itu harus dilibatkan dalam perhitungan.

Contoh 5.14

Sebuah induktor dengan induktansi 0,3 mH dihubungkan dengan sumber tegangan AC 220V, 50 Hz. Tentukan:

- a. reaktansi induktif, dan
b. arus efektif yang melalui induktor.

Jawab

Diketahui: $L = 0,3 \text{ H}$, $V_{ef} = 220 \text{ V}$ (jika tidak disebutkan secara spesifik, nilai tegangan adalah tegangan efektif), dan $f = 50 \text{ Hz}$.

- a. Reaktansi induktif adalah
 $X_L = \omega L = 2\pi fL = (2)(3,14)(50 \text{ Hz})(0,3 \text{ H}) = 2,34 \Omega$.
b. Arus efektif adalah

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_L} = \frac{220 \text{ V}}{2,34 \Omega} = 94,2 \text{ A}.$$

3. Kapasitor dalam Rangkaian AC

Rangkaian kapasitor dan sumber tegangan AC diperlihatkan pada **Gambar 5.22(a)**. Tegangan pada kapasitor sama dengan tegangan sumber, yakni

$$V_C = V_m \sin \omega t \quad (5-34)$$

Selanjutnya, arus yang mengalir melalui kapasitor ditentukan sebagai berikut.

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(CV_C) = \frac{d}{dt}(CV_m \sin \omega t) = \omega CV_m \cos \omega t$$

Dari trigonometri, $I_C = \omega CV_m \sin(\omega t + \frac{1}{2}\pi)$ maka

$$I_C = \omega CV_m \sin(\omega t + \frac{1}{2}\pi) \text{ atau } I_C = I_m \sin(\omega t + \frac{1}{2}\pi) \quad (5-35)$$

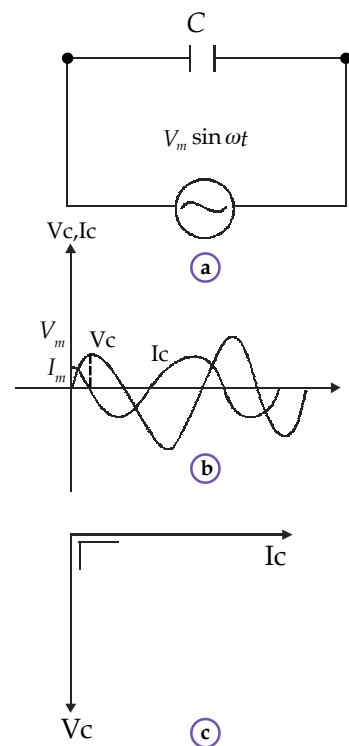
dengan

$$I_m = \omega CV_m.$$

Perbandingan antara tegangan dan arus pada kapasitor disebut reaktansi kapasitif, yakni

$$X_C = \frac{V_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C} \quad (5-36)$$

Persamaan (5-34) dan (5-35) menunjukkan bahwa tegangan dan arus berbeda fase $\frac{1}{2}$ rad, dengan arus mendahului tegangan. Grafik tegangan dan arus pada kapasitor terhadap waktu diperlihatkan pada **Gambar 5.22(b)**, sedangkan diagram fasornya diperlihatkan pada **Gambar 5.22(c)**.



Gambar 5.22

- (a) Rangkaian kapasitor dan sumber tegangan AC.
- (b) Grafik tegangan dan arus terhadap waktu.
- (c) Diagram fasor tegangan dan arus pada kapasitor.

Contoh 5.15

Sebuah kapasitor dengan $0,1 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan generator AC. Tegangan yang dihasilkan generator memenuhi persamaan $V = 120\sqrt{2} \sin 120\pi t$. Tentukan:

- a. reaktansi kapasitif dari kapasitor, dan
- b. arus efektif yang mengalir dalam rangkaian.

Jawab

Diketahui: $C = 0,1 \mu\text{F} = 0,1 \times 10^{-6} \text{F}$.

Dari persamaan $V = 120\sqrt{2} \sin 120\pi t$ diperoleh

$V_m = 120\sqrt{2} \text{ V}$ atau $V_{ef} = 120 \text{ V}$ dan $\omega = 120\pi = (120)(3,14) = 377 \text{ rad/s}$.

- a. Reaktansi kapasitifnya adalah

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(377 \text{ rad/s})(0,1 \times 10^{-6} \text{F})} = 265 \Omega.$$

- b. Arus efektifnya adalah

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_C} = \frac{120 \text{ V}}{265 \Omega} = 0,45 \text{ A}.$$

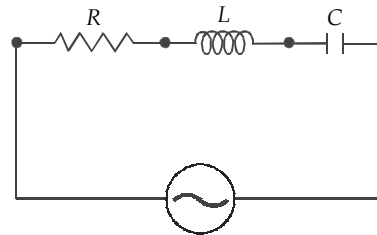
Soal Penguasaan Materi 5.4

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Arus listrik yang dikeluarkan sumber tegangan memenuhi persamaan $I = 8 \sin 100t$, dengan I dalam ampere dan t dalam sekon, ketika dihubungkan dengan sebuah induktor dengan induksi 0,25 H. Tentukan:
 - a. reaktansi induktif dari induktor, dan
 - b. tegangan efektif pada induktor.
2. Dua buah kapasitor, $C_1 = 0,1 \mu\text{F}$ dan $C_2 = 0,2 \mu\text{F}$, dirangkai seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan 120 V, 200 rad/s. Tentukan arus efektif yang mengalir pada rangkaian.

E Rangkaian AC RLC Seri

Dalam praktiknya, resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) dapat dirangkai seri, paralel, atau gabungan keduanya. Akan tetapi, pembahasan di sini akan difokuskan pada rangkaian RLC seri. **Gambar 5.23** memperlihatkan rangkaian RLC seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan AC.



Gambar 5.23

Rangkaian AC RLC seri.

Arus listrik pada setiap komponen adalah sama ($I_R = I_L = I_C$). Oleh karena itu, anggaplah arus listrik pada rangkaian memenuhi persamaan

$$I = I_m \sin \omega t \quad (5-37)$$

Secara umum, tegangannya dinyatakan oleh

$$V = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5-38)$$

Misalnya, tegangan pada setiap komponen adalah V_R , V_L , dan V_C berturut-turut untuk tegangan pada resistor, induktor, dan kapasitor, sedangkan tegangan sumbernya V . Berbeda dengan rangkaian arus searah, pada rangkaian AC seri tidak berlaku penjumlahan tegangan seperti biasa atau $V \neq V_R + V_L + V_C$. Untuk menganalisis rangkaian AC, digunakan bantuan fasor.

1. Hubungan antara V , V_R , V_L , dan V_C

Gunakanlah diagram fasor untuk menurunkan hubungan antara tegangan sumber dan tegangan pada setiap komponen dalam rangkaian. Dari pembahasan sebelumnya, diketahui bahwa:

- a. pada resistor, arus dan tegangan sefase maka fasor I_R dan V_R berimpit;
- b. pada induktor, arus tertinggal oleh tegangan (atau tegangan mendahului arus) dengan beda fase $\frac{1}{2} \pi$ rad maka fasor I_L dan V_L saling tegak lurus;
- c. pada kapasitor, arus mendahului tegangan (atau tegangan tertinggal oleh arus) dengan beda fase $\frac{1}{2} \pi$ rad maka fasor I_C dan V_C saling tegak lurus.

Jika fasor-fasor tersebut digambarkan dengan titik tangkap yang sama, diperoleh diagram fasor seperti pada **Gambar 5.24(a)**. Pada gambar tersebut, fasor I , I_L , dan I_C berimpit karena besarnya sama dan diwakili oleh fasor I , yakni arus yang mengalir dalam rangkaian. Perhatikan bahwa fasor V_L dan V_C berlawanan maka jumlah (resultan) keduanya adalah $V_L - V_C$. Selanjutnya, fasor $V_L - V_C$ tersebut tegak lurus dengan fasor V_R sehingga resultannya V , dapat dilukiskan seperti pada **Gambar 5.24(b)**. Dengan menggunakan dalil Pythagoras untuk segitiga pada **Gambar 5.24(b)**, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad (5-39)$$

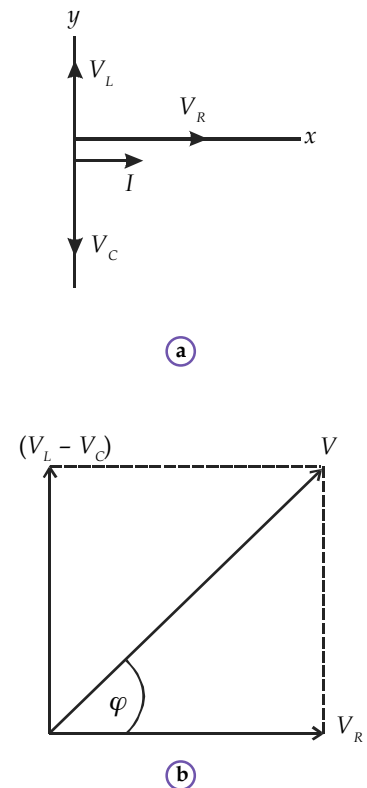
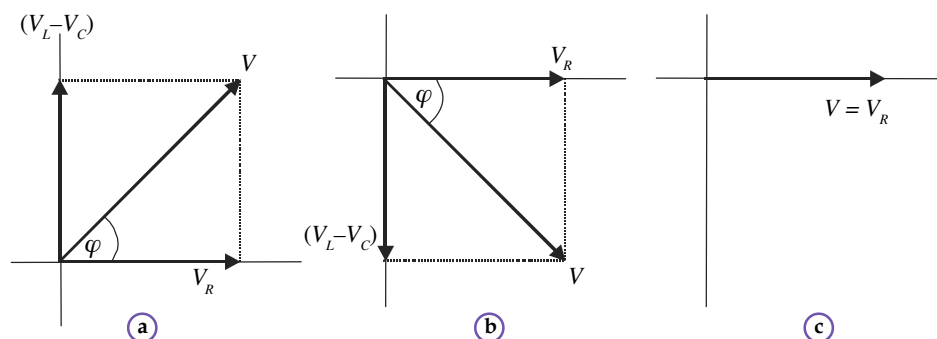
Oleh karena semua komponen tegangan telah dijumlahkan, yakni V_R , V_L , dan V_C berarti V adalah tegangan total atau tegangan sumber.

Seperti telah disinggung sebelumnya, beda fase antara tegangan dan arus sama dengan sudut antara fasor tegangan dan fasor arus. Pada **Gambar 5.24(b)**, fasor arus berimpit dengan fasor V_R . Dengan demikian, sudut antara V dan V_R , yakni φ , sama dengan sudut fase antara tegangan dan arus. Dari **Gambar 5.24(b)** jelas bahwa

$$\tan \varphi = \frac{V_L - V_C}{V_R} \quad (5-40)$$

2. Sifat Rangkaian

Persamaan (5-40) memperlihatkan bahwa sudut fase (φ) dapat bernilai positif dan negatif, bergantung pada $V_L - V_C$. Jika $V_L - V_C > 0$ (positif) atau $V_L > V_C$, $\tan \varphi > 0$ sehingga sudut fasenya positif ($\varphi > 0$). Sudut fase positif menunjukkan bahwa tegangan mendahului arus atau rangkaian bersifat *induktif* (ingat pada induktor, tegangan mendahului arus). Jika $V_L - V_C < 0$ (negatif) atau $V_L < V_C$, $\tan \varphi < 0$ sehingga sudut fasenya negatif ($\varphi < 0$). Sudut fase negatif menunjukkan bahwa tegangan tertinggal oleh arus. Sifat tersebut dimiliki oleh kapasitor. Oleh karena itu, rangkaian dikatakan bersifat *kapasitif*. Selanjutnya, jika $V_L - V_C = 0$ atau $V_L = V_C$, $\tan \varphi = 0$ atau $\varphi = 0$. Keadaan tersebut menunjukkan fasor tegangan berimpit dengan arus, sama dengan fasor tegangan dan arus pada resistor. Oleh karena itu, rangkaian dikatakan bersifat *resistif* atau rangkaian beresonansi. Diagram fasor untuk ketiga keadaan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 5.25**.



Gambar 5.24

- (a) Diagram fasor tegangan pada rangkaian AC RLC seri.
- (b) Fasor tegangan total V merupakan resultan dari fasor V_R dan fasor $V_L - V_C$.

Gambar 5.25

- Diagram fasor pada:
- (a) rangkaian bersifat induktif,
 - (b) rangkaian bersifat kapasitif, dan
 - (c) rangkaian bersifat resistif (resonansi).

Kata Kunci

- Impedansi
- Induktor
- Kapasitor
- Rangkaian AC
- Rangkaian AC *RLC* seri
- Resistor
- Resonansi listrik

3. Impedansi

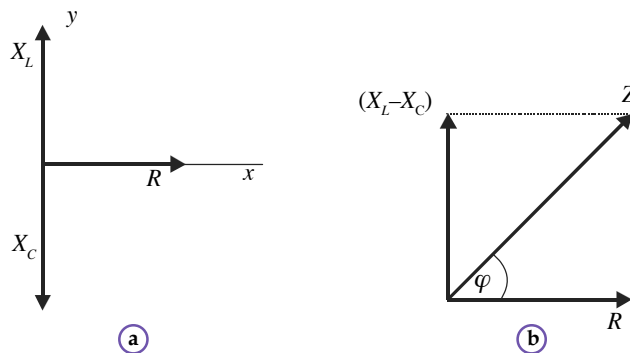
Pada rangkaian arus searah, perbandingan antara tegangan dan arus sama dengan hambatan (resistansi), seperti yang diberikan oleh Hukum Ohm. Pada rangkaian AC, perbandingan antara tegangan dan arus disebut *impedansi* atau hambatan total rangkaian. Secara matematis, impedansi dituliskan

$$Z = \frac{V}{I} \quad (5-41)$$

Dengan konsep ini, impedansi pada resistor, induktor, dan kapasitor masing-masing sebagai berikut.

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = R, \quad Z_L = \frac{V_L}{I_L} = X_L, \quad \text{dan} \quad Z_C = \frac{V_C}{I_C} = X_C \quad (5-42)$$

Dengan demikian, impedansi pada resistor tidak lain adalah resistansi resistor (R), pada induktor, impedansinya sama dengan reaktansi induktif (X_L), dan pada kapasitor, impedansinya sama dengan reaktansi kapasitif (X_C).



Gambar 5.26

Diagram fasor impedansi.

Berdasarkan **Persamaan (5-42)**, karena $I_R = I_L = I_C$ untuk rangkaian AC seri, diagram fasor impedansi mirip dengan diagram fasor untuk tegangan, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5.26**. Dari **Gambar 5.26(b)** terlihat bahwa impedansi rangkaian memenuhi persamaan

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5-43)$$

dan sudut fase rangkaian dapat dicari menggunakan persamaan

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{X_R} \quad (5-44)$$

Persamaan (5-44) juga menunjukkan bahwa sifat rangkaian dapat diketahui dengan membandingkan besar X_L dan X_C . Jika $X_L > X_C$, rangkaian bersifat *induktif*, jika $X_L < X_C$, rangkaian bersifat *kapasitif*, dan jika $X_L = X_C$, rangkaian *beresonansi*.

4. Resonansi Listrik

Seperti telah Anda ketahui, resonansi pada rangkaian AC terjadi ketika $X_L = X_C$. Nilai $X_L = X_C$ menyebabkan impedansi rangkaian menjadi minimum, yaitu $Z = R$. Keadaan tersebut menyebabkan arus listrik dan daya pada rangkaian menjadi maksimum.

Frekuensi tegangan atau arus ketika terjadi resonansi disebut *frekuensi resonansi*. Besar frekuensi resonansi ditentukan sebagai berikut. Oleh karena $X_L = X_C$

maka

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

sehingga diperoleh

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \text{ atau } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Dengan demikian, frekuensi resonansinya adalah

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-40)$$

Resonansi listrik banyak digunakan dalam piranti elektronika. Rangkaian elektronik untuk membangkitkan frekuensi resonansi disebut *osilator*. Sebagai contoh, radio dan televisi menggunakan osilator untuk membangkitkan frekuensi. Gelombang dengan frekuensi yang dihasilkan osilator tersebut akan dipancarkan melalui antena ke segala arah. Pada radio atau televisi, penerima pun menggunakan osilator (sebagai penala frekuensi) untuk menangkap gelombang televisi atau radio dari stasiun pemancar.

Contoh 5.16

Sebuah resistor dan sebuah induktor dirangkai seri dan dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan AC. Amperemeter AC digunakan untuk mengukur tegangan pada tiap komponen. Ketika digunakan untuk mengukur tegangan pada resistor, voltmeter menunjukkan angka 30 V, sedangkan ketika mengukur tegangan pada induktor, voltmeter menunjukkan angka 40 V. Berapakah angka yang ditunjukkan voltmeter ketika digunakan untuk mengukur tegangan sumber?

Jawab

Diketahui: $V_R = 30$ V dan $V_L = 40$ V.

Karena fasor V_R dan V_L saling tegak lurus (lihat **Gambar 5.24**), tegangan sumber

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ V.}$$

Contoh 5.17

Resistor 400Ω , induktor 2 H, dan kapasitor $20 \mu\text{F}$ dirangkai seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan 220V, 100 rad/s. Tentukan:

- impedansi rangkaian,
- arus efektif dalam rangkaian,
- sudut fase antara tegangan dan arus,
- sifat rangkaian, dan
- tegangan pada setiap komponen.

Jawab

Diketahui: $R = 400 \Omega$, $L = 2$ H, $C = 20 \mu\text{F} = 20 \times 10^{-6}$ F, $V_{\text{ef}} = 220$ V, dan $\omega = 100$ rad/s.

- Impedansi rangkaian dapat ditentukan setelah Anda menentukan reaktansi induktif dan kapasitifnya sebagai berikut.

$$X_L = \omega L = (100 \text{ rad/s})(2 \text{ H}) = 200 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(100 \text{ rad/s})(20 \times 10^{-6} \text{ F})} = 500 \Omega$$

maka impedansi rangkaian adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(400 \Omega)^2 + (200 \Omega - 500 \Omega)^2} = 500 \Omega.$$

Solusi Cerdas

Rangkaian seri *RLC* dengan nilai $R = 30 \text{ ohm}$, $L = 40 \text{ mH}$, dan $C = 50 \mu\text{F}$ dihubungkan pada sumber listrik. Rangkaian ini akan beresonansi pada frekuensi

- $\frac{10}{\sqrt{10}} \text{ Hz}$
- $\frac{250}{\sqrt{2}} \text{ Hz}$
- $40 \sqrt{10} \text{ Hz}$
- $\frac{2.500}{\sqrt{10}} \text{ Hz}$
- 1.000 Hz

Penyelesaian

Diketahui: Rangkaian seri *RLC* dengan $R = 30 \text{ ohm}$,

$L = 40 \text{ mH}$, dan $C = 50 \mu\text{F}$.

Rangkaian *RLC* seri akan beresonansi pada frekuensi:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(40 \times 10^{-3})(50 \times 10^{-6})}} \\ &= \frac{10^3}{2\pi\sqrt{2}} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{1}{\pi} 250\sqrt{2} \\ &= \frac{250}{\sqrt{2}} \text{ Hz} \end{aligned}$$

Jawab: b

Ebtanas SMU 1999/2000



- b. Arus efektif pada rangkaian adalah

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{220 \text{ V}}{500 \Omega} = 0,44 \text{ A.}$$

- c. Sudut fase antara arus dan tegangan adalah

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{200 \Omega - 500 \Omega}{400 \Omega} = -\frac{3}{4}$$

$$\text{maka } \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{3}{4} \right) = -37^\circ$$

- d. Karena sudut fasenya negatif (-37°), rangkaian bersifat kapasitif. Dengan kata lain, tegangan tertinggal oleh arus dengan beda fase 37° .

Sifat rangkaian juga dapat diketahui dengan membandingkan X_L dan X_C . Pada rangkaian tersebut, $X_L < X_C$ maka rangkaian bersifat kapasitif.

- e. Tegangan pada resistor, induktor, dan kapasitor masing-masing sebagai berikut.

$$V_R = I_{ef} R = (0,44 \text{ A})(400 \Omega) = 176 \text{ V.}$$

$$V_L = I_{ef} X_L = (0,44 \text{ A})(200 \Omega) = 88 \text{ V.}$$

$$V_C = I_{ef} X_C = (0,44 \text{ A})(500 \Omega) = 220 \text{ V.}$$

Soal Penguasaan Materi 5.5

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Rangkaian $R L C$ seri dengan $R = 600 \Omega$, $L = 200 \text{ mH}$, dan $C = 1 \mu\text{F}$ dihubungkan dengan sumber tegangan 120 V , $\frac{500}{\pi} \text{ Hz}$. Tentukan:
 - impedansi rangkaian,
 - arus efektif pada rangkaian,
 - sudut fase rangkaian, dan
 - tegangan pada setiap komponen
- Sebuah induktor memiliki hambatan murni 3Ω dan induktansi $0,04 \text{ H}$. Induktor tersebut dihubungkan ke sumber tegangan $V = 20\sqrt{2} \sin 100t \text{ volt}$. Tentukan:
 - impedansi induktor, dan
 - arus efektif yang mengalir pada induktor.
- Tegangan pada rangkaian RLC seri memenuhi persamaan $V = 200\sqrt{2}$. Diketahui resistansi resistor $R = 50 \Omega$ dan pada $t = 0$ arus listriknya nol.
 - Gambarkan diagram fasor antara tegangan dan arusnya.
 - Berapakah sudut fase antara arus dan tegangan? Manakah yang mendahului, arus atau tegangan?
 - Berapakah impedansi rangkaian?
 - Tentukan arus efektif yang mengalir pada rangkaian.
- Resistor 200Ω dan kapasitor $25 \mu\text{F}$ dirangkai seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan 120 V , 200 rad/s . Tentukan:
 - impedansi rangkaian,
 - arus yang mengalir pada rangkaian, dan
 - tegangan pada setiap komponen.

F Daya pada Rangkaian AC

Kata Kunci

- Daya
- Faktor daya

Dengan menggunakan analisis fasor, daya rata-rata dapat dinyatakan sebagai perkalian titik antara fasor arus dan fasor tegangan. Ingat perkalian titik antara dua vektor

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \varphi$$

dengan φ adalah sudut antara $\mathbf{A}$ dan $\mathbf{B}$. Dengan analogi yang sama, perkalian titik antara dua fasor, misalnya antara tegangan dan arus sebagai berikut.

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{I} = VI \cos \varphi$$

Dalam rangkaian arus searah, fasor tegangan dan arus selalu sefase (berarah sama) maka $\cos \varphi = 1$ sehingga dayanya memenuhi persamaan

$$P = VI \cos \varphi = VI$$

Tegangan dan arus pada resistor sefase maka daya rata-rata yang diserap resistor memenuhi

$$P_R = V_{ef} I_{ef} \quad \text{atau} \quad P_R = I_{ef}^2 R \quad (5-46)$$

Di lain pihak, tegangan dan arus pada induktor ataupun kapasitor berbeda fase $\frac{1}{2}\pi$ maka daya pada induktor atau kapasitor adalah

$$P = V \cdot I = VI \cos \frac{1}{2}\pi = 0 \quad (5-47)$$

Sebenarnya induktor dan kapasitor menyimpan daya pada setiap setengah siklus pertama, tapi mereka melepaskan kembali daya tersebut pada setengah siklus berikutnya. Secara keseluruhan tidak ada daya yang diserap oleh induktor maupun kapasitor, seperti diperlihatkan pada **Persamaan (5-47)**.

Pada rangkaian AC RLC seri, tegangan dan arus secara umum memiliki beda fase φ (lihat kembali **Gambar 5.24** atau **Gambar 5.26**). Dengan demikian, daya rata-rata yang diserap pada rangkaian tersebut memenuhi persamaan

$$P = V \cdot I = VI \cos \varphi \quad (5-48)$$

Besaran $\cos \varphi$ disebut *faktor daya*. Dari **Gambar 5.24** atau **Gambar 5.26** terlihat bahwa faktor daya memenuhi persamaan

$$p_f = \cos \varphi = \frac{V_R}{V} = \frac{R}{Z} \quad (5-49)$$

dengan p_f = faktor daya (*power factor*).

Contoh 5.18

Tegangan yang terukur pada resistor, induktor, dan kapasitor pada rangkaian AC RLC seri berturut-turut adalah 20 V, 30 V, dan 50 V. Arus listrik yang mengalir pada rangkaian tersebut adalah 2,5 A. Tentukan:

- faktor daya, dan
- daya yang diserap rangkaian.

Jawab

Diketahui: $V_R = 20$ V, $V_L = 30$ V, $V_C = 50$ V, dan $I = 2,5$ A.

Tegangan total rangkaian adalah

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = \sqrt{(20\text{ V})^2 + (30\text{ V} - 50\text{ V})^2} = 20\sqrt{2} \text{ V}.$$

- Faktor daya adalah

$$p_f = \cos \varphi = \frac{V_R}{V} = \frac{20 \text{ V}}{20\sqrt{2} \text{ V}} = \frac{1}{2}\sqrt{2}.$$

- Daya yang diserap rangkaian adalah

$$P = VI \cos \varphi = (20\sqrt{2} \text{ V})(2,5 \text{ A})\left(\frac{1}{2}\sqrt{2}\right) = 50 \text{ W}.$$

Soal Penguasaan Materi 5.6

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Tegangan yang terukur pada resistor dari rangkaian AC RLC seri adalah 40 V. Jika tegangan sumbernya 50 V, berapakah faktor dayanya?
2. Resistansi resistor, reaktansi induktif, dan reaktansi kapasitif dari rangkaian AC RLC seri berturut-turut

adalah $50\ \Omega$, $150\ \Omega$, dan $30\ \Omega$. Tegangan sumbernya adalah 130 V. Tentukan:

- a. faktor daya, dan
- b. daya yang diserap rangkaian.

Pembahasan Soal SPMB

Tongkat konduktor yang panjangnya 1 m berputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar 10 rad/s di dalam daerah bermedan magnet seragam $B = 0,1\text{ T}$. Sumbu putaran tersebut melalui salah satu ujung tongkat dan sejajar arahnya dengan arah garis-garis medan magnet. GGL yang terinduksi antara kedua ujung tongkat adalah

- a. 0,5 V
- b. 1 V
- c. 1,6 V
- d. 3,1 V
- e. 6 V

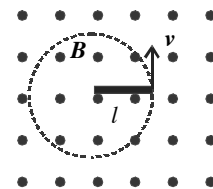
Penyelesaian

Diketahui: tongkat konduktor berputar pada salah satu ujungnya dengan $l = 1\text{ m}$, $\omega = 10\text{ rad/s}$, dan $B = 0,1\text{ T}$. Dari Persamaan 5-5, GGL yang terinduksi antara kedua

ujung tongkat adalah

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon} &= \frac{1}{2} B \omega l^2 \\ &= \frac{1}{2} (0,1)(10)(1)^2 \\ &= 0,5\text{ V}\end{aligned}$$

Jawab: a



UMPTN 2000

Rangkuman

1. Menurut **Faraday**, perubahan medan magnet dapat menghasilkan arus induksi dan GGL induksi. Peristiwa munculnya arus dan GGL induksi akibat perubahan medan magnet disebut **induksi elektromagnetik**.
2. **Hukum Lenz** menyatakan bahwa arus induksi selalu menimbulkan medan magnet induksi yang berlawanan dengan perubahan medan magnet asalnya.
3. **Fluks magnet** adalah jumlah garis-garis gaya medan magnet yang merambat tegak lurus bidang dengan luas tertentu.

$$\Phi = BA \cos \theta$$

GGL induksi pada kumparan sebanding dengan laju perubahan fluks magnet dan jumlah lilitan kumparan.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{dan} \quad \bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

4. Menurut **Henry**, perubahan arus listrik pada kumparan dapat menghasilkan **GGL induksi diri**. GGL induksi diri sebanding dengan laju perubahan arus listrik dalam kumparan.

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt} \quad \text{dan} \quad \bar{\varepsilon} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Kumparan yang memiliki induktansi diri disebut **induktor**.

$$L = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta i}$$

5. Jika dua kumparan berdekatan dan satu sama lain terjadi perubahan arus listrik, akan muncul **induktansi silang**.

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{\ell}$$

6. Induktor berfungsi menyimpan energi dalam bentuk medan magnet.

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

7. Generator arus listrik mengubah energi mekanik menjadi listrik. Generator menghasilkan GGL yang berubah secara sinusoidal.

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$$

$$\varepsilon_m = NBA\omega$$

8. **Trafo** adalah alat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik bolak-balik. Naik atau turunnya tegangan pada trafo bergantung pada perbandingan antara jumlah lilitan primer dan sekunder.

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Besarnya **efisiensi trafo** dapat diketahui dari perbandingan antara daya pada kumparan primer dan daya pada kumparan sekunder.

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\%$$

9. Selain generator dan trafo, alat-alat yang memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik antara lain rem magnet, mikrofon, dan *tape recorder*.
10. Arus listrik bolak-balik dibangkitkan oleh generator AC.

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Akar dari nilai rata-rata kuadrat arus disebut nilai rms (*root-mean-square*) atau nilai efektif.

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Hubungan antara tegangan efektif dan tegangan maksimum adalah

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

11. **Arus rata-rata** adalah arus bolak-balik yang menghasilkan muatan yang sama dengan muatan yang dihasilkan arus searah dalam waktu yang sama.

$$\bar{I} = \frac{2I_m}{\pi}$$

12. Jika resistor dihubungkan dengan sumber tegangan AC, tegangan dan arus listriknya adalah

$$V_R = V_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad i_R = I_m \sin \omega t$$

13. Jika induktor dihubungkan dengan sumber tegangan AC, tegangan dan arus listriknya adalah

$$V_L = V_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad I_L = I_m \sin\left(\omega t - \frac{1}{2}\pi\right)$$

14. Jika kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan AC, tegangan dan arus listriknya adalah

$$V_C = V_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad I_C = I_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

15. Jika rangkaian RLC seri dihubungkan dengan sumber tegangan AC, arus dan tegangannya adalah

$$I = I_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad V = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

16. **Impedansi** rangkaian RLC

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

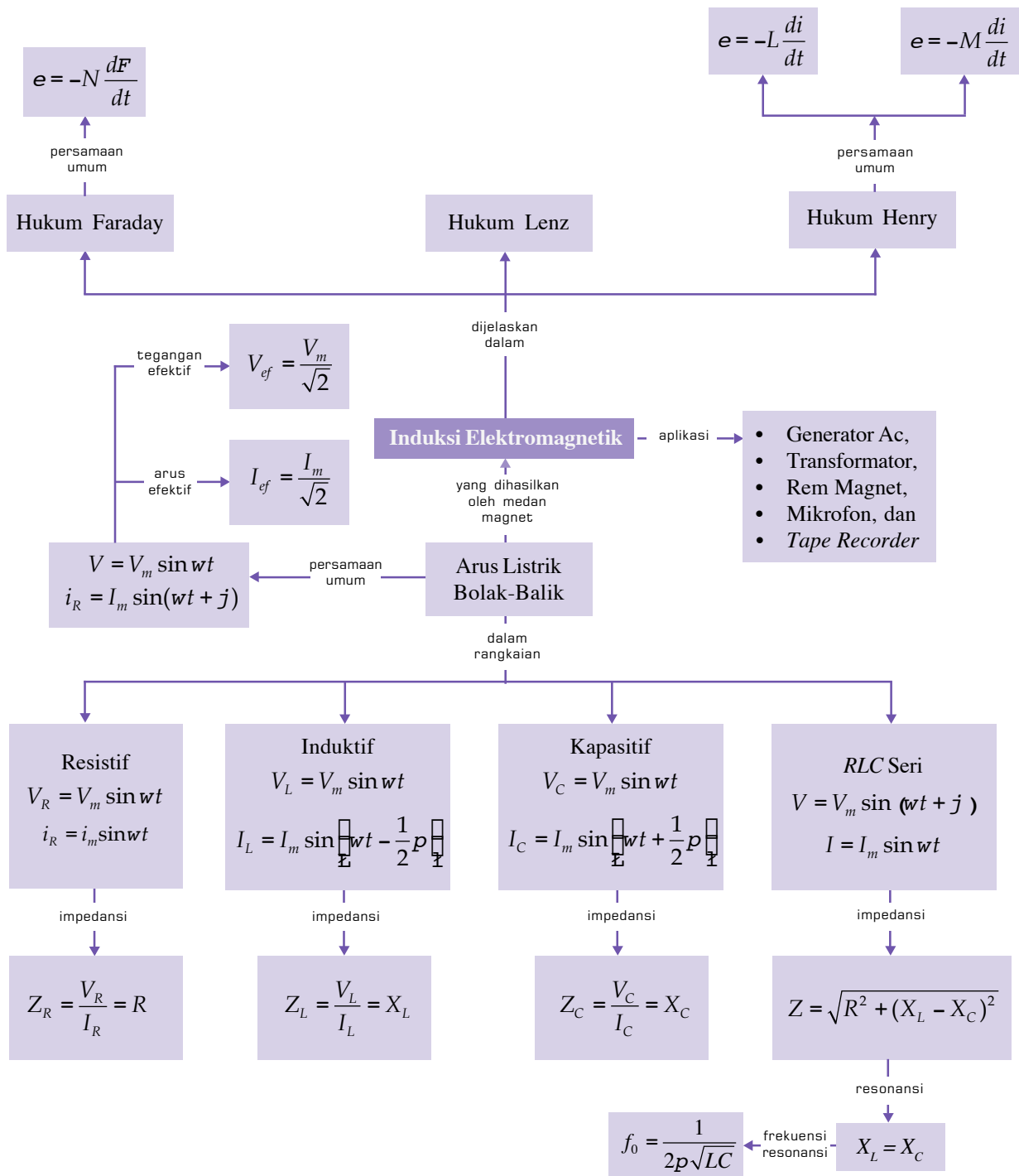
17. **Resonansi** rangkaian RLC

$$X_L = X_C \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

18. **Daya** pada rangkaian AC

$$P = VI \cos \varphi$$

Peta Konsep



Kaji Diri

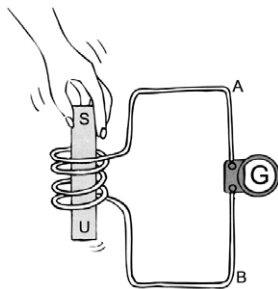
Setelah mempelajari bab Induksi Elektromagnetik dan Arus Listrik Bolak-balik, Anda dapat memformulasikan konsep induksi Faraday dan arus bolak-balik serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Jika Anda belum mampu memformulasikan konsep induksi Faraday dan arus bolak-balik serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari, Anda belum menguasai materi bab Induksi Elektro-

magnetik dan Arus Listrik Bolak-Balik dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

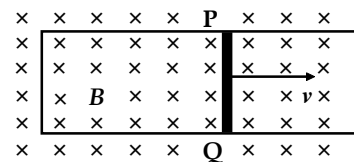
Evaluasi Materi Bab 5

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah bidang seluas 100 cm^2 ditembus secara tegak lurus oleh garis-garis gaya magnet yang kerapatannya $5 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$. Besar fluks magnet yang dilingkupi bidang tersebut adalah
 - nol
 - $2 \times 10^{-6} \text{ Wb}$
 - $2,5 \times 10^{-6} \text{ Wb}$
 - $4 \times 10^{-6} \text{ Wb}$
 - $5 \times 10^{-6} \text{ Wb}$
- Menurut Faraday, GGL induksi pada kumparan adalah
 - sebanding dengan laju perubahan fluks magnet
 - berbanding terbalik dengan laju perubahan fluks magnet
 - sebanding dengan lamanya perubahan fluks magnet
 - berbanding terbalik dengan jumlah lilitan pada kumparan
 - sebanding dengan periode putaran kumparan
- Berdasarkan Hukum Faraday, satuan weber identik dengan
 - volt/sekon
 - watt/sekon
 - ampere/sekon
 - volt sekon
 - ampere sekon
- Perhatikan gambar disamping. Sebuah kumparan dihubungkan dengan galvanometer yang peka. Sandainya arus mengalir dari A ke B melalui galvanometer G, jarum galvanometer akan bergerak ke kanan. Jika kutub U magnet dimasukkan, kemudian dikeluarkan dari kumparan, jarum galvanometer akan bergerak
 - ke kanan, kemudian berhenti
 - ke kiri, kemudian berhenti
 - ke kanan, ke kiri, kemudian berhenti
 - ke kanan, kemudian ke kiri
 - ke kiri, ke kanan, kemudian berhenti
- Fluks magnetik yang memotong sebuah kumparan dari 10 lilitan berkurang dari $5 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ menjadi nol dalam selang waktu 0,2 sekon. Besar GGL induksi dalam kumparan adalah
 - 1 V
 - 2,5 V
 - 5 V
 - 7,5 V
 - 10 V



- Fluks magnet yang dilingkupi sebuah kumparan yang terdiri atas 50 lilitan berubah menurut persamaan $\Phi = 10^{-2} \sin 200t$, dengan Φ dalam weber dan t dalam sekon. Jika hambatan kumparan 20Ω , kuat arus listrik maksimum pada kumparan adalah
 - 1 A
 - 2 A
 - 2,5 A
 - 4 A
 - 5 A
- Kawat PQ yang panjangnya 25 cm digeser ke kanan dengan kecepatan 4 m/s seperti pada gambar berikut.



Jika induksi magnet 0,2 T, besar GGL dan arah arus pada kawat PQ masing-masing adalah

- 0,2 V dari P ke Q
 - 0,2 V dari Q ke P
 - 2,5 V dari P ke Q
 - 2,5 V dari Q ke P
 - 20 V dari P ke Q
- Tongkat konduktor yang panjangnya 1 m berputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar 10 rad/s di dalam daerah bermedan magnet seragam 0,1 T. Sumbu putaran tersebut melalui salah satu ujung tongkat dan sejajar dengan arah garis-garis gaya medan magnet di atas. GGL yang terinduksi antara kedua ujung tongkat besarnya
 - 0,5 V
 - 1 V
 - 1,6 V
 - 3,1 V
 - 6 V
 - Suatu kumparan terdiri atas 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan tersebut memiliki sumbu putar yang tegak lurus medan magnet sebesar 0,5 T dan diputar dengan kecepatan sudut 60 rad/s . GGL maksimum yang timbul pada ujung-ujung kumparan adalah
 - 5 V
 - 30 V
 - 50 V
 - 60 V
 - 220 V
 - Agar GGL maksimum yang dihasilkan generator menjadi dua kali semula, pernyataan yang benar adalah
 - frekuensi putarannya dijadikan setengah kali semula
 - periode putarannya dijadikan setengah kali semula
 - jumlah lilitannya dijadikan setengah kali semula
 - luas penampang dan jumlah lilitan kumparan dijadikan dua kali semula
 - kawat kumparan diganti dengan kawat yang ketebalannya dua kali semula



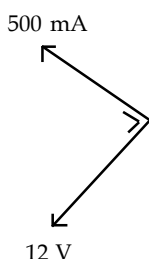
11. Dua buah generator AC yang induksi magnet dan jumlah lilitannya sama menghasilkan GGL yang besarnya sama. Jika luas kumparan pertama 4 kali luas kumparan kedua, kecepatan putar kumparan kedua sama dengan
- $\frac{1}{4}$ kali kecepatan putar kumparan pertama
 - $\frac{1}{2}$ kali kecepatan putar kumparan pertama
 - 1 kali kecepatan putar kumparan pertama
 - 2 kali kecepatan putar kumparan pertama
 - 4 kali kecepatan putar kumparan pertama
12. Efisiensi sebuah transformator adalah 60%, artinya
- kuat arus pada kumparan primer berbanding kuat arus pada kumparan sekunder 5 : 3
 - tegangan pada kumparan primer berbanding tegangan pada kumparan sekunder 3 : 5
 - jumlah lilitan kumparan primer berbanding jumlah lilitan kumparan sekunder 3 : 5
 - daya pada kumparan primer berbanding daya pada kumparan sekunder 5 : 3
 - hambatan pada kumparan primer berbanding hambatan pada kumparan sekunder 3 : 5
13. Sebuah transformator memiliki perbandingan lilitan primer dan sekunder 2 : 1. Bagian sekunder transformator dihubungkan dengan lima buah lampu 8W, 50V yang disusun paralel. Jika efisiensi transformator 80% dan lampu-lampu menyala normal, kuat arus primernya adalah
- 0,16 A
 - 0,4 A
 - 0,5 A
 - 0,8 A
 - 1,25 A
14. Perbandingan jumlah lilitan kawat pada kumparan primer dan sekunder sebuah transformator adalah 1 : 4. Tegangan dan kuat arus masukannya masing-masing 10 V dan 2 A. Jika daya rata-rata yang berubah menjadi kalor pada transformator tersebut adalah 4 W dan tegangan keluarannya 40 V, arus keluarannya sebesar
- 0,1 A
 - 0,4 A
 - 0,5 A
 - 0,6 A
 - 0,8 A
15. Sebuah kumparan memiliki 100 lilitan dan induktansinya 0,4 henry. Jika pada kumparan tersebut terjadi perubahan kuat arus dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 sekon, GGL induksi diri pada kumparan tersebut adalah
- 8 volt
 - 16 volt
 - 32 volt
 - 64 volt
 - 80 volt
16. Sebuah induktor memiliki induktansi 50 mH. Pada induktor tersebut mengalir arus 10 A. Energi yang tersimpan pada induktor adalah
- 0,25 J
 - 0,5 J
 - 2,5 J
 - 5 J
 - 25 J
17. Generator AC membangkitkan tegangan listrik dengan persamaan $V = 120\sqrt{2} \sin 100\pi t$ volt, dengan t dalam sekon. Tegangan efektif dan frekuensi tegangan tersebut adalah
- 120 V dan 100 Hz
 - 120 V dan 50 Hz
 - 120 V dan 100 Hz
 - 120 V dan 50 Hz
 - 100 V dan 120 Hz
18. Sebuah amperemeter AC mengukur arus listrik dalam rangkaian. Jarum amperemeter menunjukkan angka 5 A. Hal tersebut menunjukkan bahwa
- arus maksimumnya 5 A
 - arus efektifnya 5 A
 - arus rata-ratanya 5 A
 - arus puncak ke puncaknya 5 A
 - arus resonansinya 5 A
19. Sebuah kumparan dengan induktansi 0,030 H dan resistansi murni $4,0 \Omega$ dihubungkan dengan sumber tegangan AC 15 V, 100 rad/s. Arus listrik yang melalui kumparan adalah
- 5 A
 - 4 A
 - 3 A
 - 2 A
 - 1 A
20. Sebuah kumparan dengan reaktansi induktif 60Ω dan hambatan ekuivalen 150Ω dirangkai seri dengan kapasitor yang reaktansi kapasitifnya 260Ω . Rangkaian tersebut dihubungkan dengan sumber AC maka
- arus mendahului tegangan dengan beda fase 37°
 - arus tertinggal oleh tegangan dengan beda fase 37°
 - arus mendahului tegangan dengan beda fase 53°
 - arus tertinggal oleh tegangan dengan beda fase 53°
 - arus mendahului tegangan dengan beda fase 60°
21. Hambatan R , induktor L , dan kapasitor C masing-masing mempunyai nilai 300 ohm, 0,9 henry, dan $2 \mu F$. Jika ketiga komponen listrik tersebut dihubungkan seri dan diberi tegangan efektif AC 50 volt, sedangkan frekuensi sudut AC 1.000 rad/s,
- impedansi rangkaian 500 ohm;
 - arus efektif rangkaian 0,1 A;
 - tegangan yang melintasi L adalah 90 V;
 - tegangan yang melintasi C adalah 50 V.
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4

22. Diketahui bahwa arus searah (DC) sebesar 3 ampere yang mengalir melewati suatu filamen pemanas mampu menghasilkan daya listrik padanya sebesar W . Jika digunakan arus bolak-balik (AC) dengan nilai puncak sebesar 3 ampere juga, besar daya listrik sekarang yang dapat dibangkitkan pada filamen adalah

- $\frac{1}{4} W$
- $\frac{1}{2} W$
- $2 W$
- $4 W$
- W

23. Perhatikan gambar berikut, gambar tersebut menunjukkan diagram fasor suatu rangkaian arus bolak-balik. Jika frekuensi arus bolak-balik 50 Hz, pernyataan yang benar adalah

- hambatannya $\frac{120}{\pi} \text{ m}\Omega$
- induktansinya $\frac{240}{\pi} \text{ mH}$
- kapasitansinya $\frac{120}{\pi} \text{ mF}$
- kapasitansinya 120 mF
- induktansinya 120 mH



24. Sebuah kumparan dialiri arus 4 A ketika dihubungkan dengan sumber DC 20 V. Ketika dihubungkan dengan sumber AC, arus yang sama diperoleh jika diberi tegangan 42 V. Jika frekuensi arus AC 50 Hz, induktansi kumparan adalah

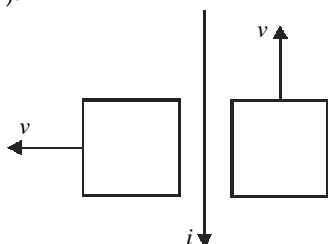
- $\frac{1,2}{\pi} \text{ mH}$
- $\frac{2,4}{\pi} \text{ mH}$
- $\frac{3,6}{\pi} \text{ mH}$
- $\frac{4,8}{\pi} \text{ mH}$
- $\frac{6,4}{\pi} \text{ mH}$

25. Rangkaian RLC seri dengan $R = 200 \Omega$, $X_L = 150 \Omega$, dan $X_C = 300 \Omega$ dihubungkan dengan generator yang membangkitkan tegangan $V = 120\sqrt{2} \sin 100\pi t$ volt, dengan t dalam sekon. Daya yang diserap rangkaian adalah

- 46 W
- 40 W
- 34 W
- 23 W
- 18 W

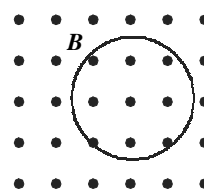
B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Tuliskan minimum 3 cara untuk memperbesar GGL induksi dalam eksperimen Faraday?
- Sebuah kumparan dengan luas penampang 100 cm^2 , hambatan 20Ω , dan jumlah lilitan 400 berada dalam medan magnet yang sejajar dengan sumbu kumparan. Induksi magnetnya berubah menurut persamaan $B = 10^{-3} \sin 2.000t$ tesla, dengan t dalam sekon. Tentukan:
 - fluks magnet sebagai fungsi waktu,
 - laju perubahan fluks magnet,
 - GGL induksi pada kumparan, dan
 - arus listrik pada kumparan.
- Dua buah kumparan persegi bergerak di sekitar kawat berarus listrik seperti diperlihatkan pada gambar berikut. Tentukan arah arus induksi pada tiap cincin (jika ada).



- Sebuah kumparan dengan jari-jari penampang 15 cm terdiri atas 20 lilitan. Kumparan tersebut terbuat dari kawat berdiameter 2,5 mm. Medan magnetik seragam, tegak lurus dengan penampang kumparan, berubah dengan laju $9 \times 10^{-3} \text{ T/s}$. Hambatan jenis kawat $2 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$. Tentukan:
 - arus pada kumparan, dan
 - daya yang dihasilkan.

5. Sebuah kumparan berbentuk lingkaran berada dalam medan magnet yang arahnya sejajar sumbu kumparan seperti gambar di samping. Jika medan magnet tiba-tiba berbalik arah, gambarkan arah arus pada kumparan.



6. Sebuah kumparan berbentuk toroida dengan jari-jari efektif 10 cm dan luas penampang 5 cm^2 . Jika kumparan terdiri atas 100 lilitan dan dialiri arus listrik 20 A. Tentukan:
- induktansi toroida, dan
 - energi yang tersimpan pada kumparan.



7. Dua buah kumparan disusun sedemikian sehingga kumparan pertama berada di dalam kumparan kedua. Kumparan pertama dihubungkan ke baterai melalui sebuah sakelar. Apakah GGL induksi muncul pada kumparan kedua ketika sakelar tersambung cukup lama? Apa yang dapat Anda lakukan agar GGL induksi senantiasa muncul pada kumparan kedua?
8. Generator AC terdiri atas kumparan dengan 200 lilitan dan luas penampang 100 cm^2 . Medan magnetnya adalah 2 T. Tentukan tegangan efektif yang dihasilkan generator jika rotornya diputar dengan kelajuan sudut 400 rad/s .
9. Ketika Anda mengukur tegangan AC menggunakan voltmeter, nilai apakah yang terbaca oleh voltmeter? Apa perbedaannya jika Anda menggunakan osiloskop?
10. Sebuah resistor dengan hambatan 600Ω , sebuah kapasitor dengan kapasitansi $5 \mu\text{F}$, dan sebuah induktor dengan induktansi 1 H disusun seri. Rangkaian tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan 200 V, 200 rad/s . Tentukan:
 - a. impedansi,
 - b. arus efektif,
 - c. sudut fase, dan
 - d. daya disipasi pada rangkaian.

Evaluasi Materi Semester 1

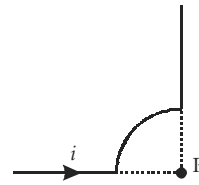
A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Seseorang mencatat bahwa puncak gelombang melewati sebuah titik setiap 2 sekon. Ia juga mengukur bahwa jarak antara dua puncak gelombang yang berdekatan adalah 5 m. Cepat rambat gelombang tersebut adalah
 - a. 2,5 m/s
 - b. 5 m/s
 - c. 7,5 m/s
 - d. 10 m/s
 - e. 15 m/s
2. Gelombang transversal merambat pada tali yang diberi gaya tegangan 180 N. Jika massa jenis linear tali sebesar 0,2 kg/m maka cepat rambat gelombangnya adalah
 - a. 15 m/s
 - b. 30 m/s
 - c. 45 m/s
 - d. 60 m/s
 - e. 90 m/s
3. Waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi untuk merambat dalam besi baja sepanjang 1 km jika dianggap kerapatan baja 8.000 kg/m³ dan modulus elastisitasnya 2×10^{11} N/m² adalah
 - a. 0,05 s
 - b. 0,1 s
 - c. 0,15 s
 - d. 0,2 s
 - e. 0,25 s
4. Sebuah gelombang transversal merambat dengan persamaan
$$y = 0,2 \sin 8\pi \left(t - \frac{x}{20} + \frac{1}{16} \right) \text{ meter,}$$
 x dalam meter, t dalam sekon maka
 - 1) cepat rambat gelombang sama dengan 20 m/s,
 - 2) panjang gelombang besarnya 5 meter,
 - 3) frekuensi sudut gelombang sama dengan 8 rad/s, dan
 - 4) sudut fase mula-mula sumber gelombang = 45.Pernyataan yang benar adalah
 - a. 1, 2, dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4
5. Pipa organa terbuka A dan pipa organa tertutup sebelah B memiliki panjang yang sama. Perbandingan frekuensi nada atas pertama antara pipa organa A dengan pipa organa B adalah
 - a. 1 : 1
 - b. 2 : 1
 - c. 2 : 3
 - d. 3 : 2
 - e. 4 : 3
6. Pada jarak 3 m dari sumber ledakan terdengar bunyi dengan taraf intensitas 50 dB. Pada jarak 30 m dari sumber ledakan, bunyi tersebut terdengar dengan taraf intensitas
 - a. 5 dB
 - b. 20 dB
 - c. 30 dB
 - d. 35 dB
 - e. 45 dB
7. Mobil ambulans bergerak dengan kelajuan 30 m/s sambil membunyikan sirene yang menghasilkan frekuensi 900 Hz. Perbedaan frekuensi yang terdengar oleh seseorang yang diam di pinggir jalan ketika mobil ambulans mendekati dan menjauhinya jika cepat rambat bunyi di udara saat itu 340 m/s adalah
 - a. 30 Hz
 - b. 60 Hz
 - c. 95 Hz
 - d. 135 Hz
 - e. 160 Hz
8. Cahaya monokromatik dari suatu sumber mengenai suatu celah kembar dan menghasilkan pola interferensi dengan jarak antara dua pola terdekat 0,25 cm dan letak layar dari celah 100 cm. Jika jarak celah 0,2 mm, panjang gelombang dari cahaya monokromatik tersebut adalah
 - a. 1.000 Å
 - b. 2.000 Å
 - c. 3.000 Å
 - d. 4.000 Å
 - e. 5.000 Å
9. Jika cahaya putih dilewatkan pada suatu kisi difraksi, warna cahaya yang mengalami deviasi paling dekat terhadap bayangan pusat adalah
 - a. jingga
 - b. merah
 - c. kuning
 - d. hijau
 - e. ungu
10. Warna biru langit terjadi karena cahaya Matahari mengalami
 - a. difraksi
 - b. hamburan
 - c. interferensi
 - d. pemantulan
 - e. pembiasan



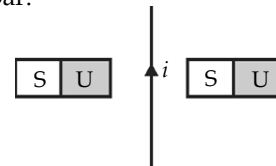
11. Dua buah muatan listrik saling menolak dengan gaya F pada jarak tertentu. Jika jaraknya dijadikan dua kali semula, gaya tolaknya menjadi
 - a. $\frac{1}{4} F$
 - b. $\frac{1}{2} F$
 - c. F
 - d. $2F$
 - e. $4F$
12. Dua buah partikel A dan B masing-masing bermuatan listrik $+20 \mu\text{C}$ dan $+45 \mu\text{C}$ terpisah dengan jarak 15 cm. Jika C adalah titik yang terletak di antara A dan B sedemikian sehingga medan di C sama dengan 0, maka letak C dari A adalah
 - a. 2 cm
 - b. 3 cm
 - c. 4 cm
 - d. 6 cm
 - e. 9 cm
13. Potensial di suatu titik yang berjarak r dari muatan Q adalah 600 V. Intensitas medan di titik tersebut sebesar 400 N/C. Jika $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, besar muatan Q adalah
 - a. $2,3 \times 10^{-9} \text{ C}$
 - b. $4,4 \times 10^{-8} \text{ C}$
 - c. $7 \times 10^{-8} \text{ C}$
 - d. $1 \times 10^{-7} \text{ C}$
 - e. $1,5 \times 10^{-9} \text{ C}$
14. Sebuah elektron dengan massa $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan muatan $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ bergerak dari satu titik ke titik lain dalam ruang yang potensialnya 1,5 volt lebih tinggi. Energi kinetik yang diperoleh elektron dalam perpindahan kedudukan itu adalah ... ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$).
 - a. 1 eV
 - b. 1,5 eV
 - c. 2 eV
 - d. 2,5 eV
 - e. 3 eV
15. Kapasitor C_1 dan C_2 yang dipasang paralel masing-masing mempunyai kapasitas $2 \mu\text{F}$ dan $4 \mu\text{F}$. Jika tegangan ujung-ujung kapasitor adalah 12 volt, maka
 - 1) kapasitas pengganti kedua kapasitor itu adalah $6 \mu\text{F}$.
 - 2) muatan listrik C_2 adalah $18 \mu\text{F}$.
 - 3) energi yang tersimpan di C_1 adalah $1,44 \times 10^{-4} \text{ J}$.
 - 4) energi yang tersimpan di C_2 adalah $5,76 \times 10^{-4} \text{ J}$.
 Pernyataan yang benar adalah
 - a. 1, 2, dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4

16. Perhatikan gambar berikut.



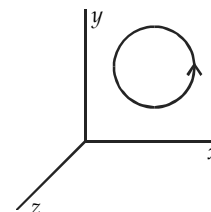
Kawat $\frac{1}{4}$ lingkaran dengan jari-jari 3 meter dialiri arus 6 ampere. Besar induksi magnet pada pusat lingkaran (P) adalah

- a. $\pi \times 10^{-5} \text{ tesla}$
 - b. $\pi \times 10^{-7} \text{ tesla}$
 - c. $4\pi \times 10^{-5} \text{ tesla}$
 - d. $4\pi \times 10^{-7} \text{ tesla}$
 - e. $7\pi \times 10^{-7} \text{ tesla}$
17. Sebuah kawat lurus sejajar berada di antara dua kutub magnet berlawanan seperti diperlihatkan pada gambar.



Ketika kawat dialiri arus listrik maka kawat tersebut akan

- a. bergerak menuju kutub S
 - b. bergerak menuju kutub U
 - c. bergerak menuju pembaca
 - d. bergerak menjauhi pembaca
 - e. tetap diam
18. Besar gaya yang dialami sebuah partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet bergantung pada hal-hal berikut, *kecuali*
 - a. massa partikel
 - b. arah gerak partikel
 - c. besar kecepatan partikel
 - d. besar muatan partikel
 - e. besar medan magnet
 19. Sebuah proton bergerak searah sumbu x positif dan masuk ke dalam medan magnet seragam sehingga menjalani gerak melingkar pada bidang xy seperti terlihat pada gambar.



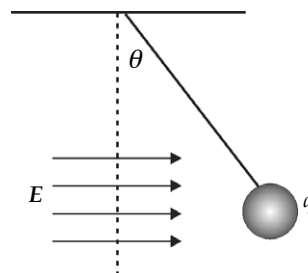
Ini berarti bahwa medan magnet tersebut searah dengan sumbu

- a. x positif
- b. y negatif
- c. y positif
- d. z negatif
- e. z positif

20. Sebuah elektron dengan energi kinetik 5.000 eV memasuki daerah bermedan magnet seragam sebesar 200 gauss yang tegak lurus terhadap arah geraknya. Jari-jari lintasan elektron dalam medan magnet tersebut adalah
- 0,12 cm
 - 1,2 cm
 - 12 cm
 - 120 cm
 - 1.200 cm
21. Menurut Faraday, GGL induksi pada kumparan adalah
- sebanding dengan laju perubahan fluks magnet
 - berbanding terbalik dengan laju perubahan fluks magnet
 - sebanding dengan lamanya perubahan fluks magnet
 - berbanding terbalik dengan jumlah lilitan pada kumparan
 - sebanding dengan periode putaran kumparan
22. Fluks magnetik yang memotong sebuah kumparan yang terdiri atas 10 lilitan berkurang dari 5×10^{-2} Wb menjadi nol dalam selang waktu 0,2 sekon. Besar GGL induksi dalam kumparan adalah
- 1 V
 - 2,5 V
 - 5 V
 - 7,5 V
 - 10 V
23. Agar GGL maksimum yang dihasilkan generator menjadi dua kali semula, yang harus dilakukan adalah
- frekuensi putarannya dijadikan setengah kali semula
 - periode putarannya dijadikan setengah kali semula
 - jumlah lilitannya dijadikan setengah kali semula
 - luas penampang dan jumlah lilitan kumparan dijadikan dua kali semula
 - kawat kumparan diganti dengan kawat yang ketebalannya dua kali semula
24. Sebuah transformator memiliki perbandingan lilitan primer dan sekunder 2 : 1. Bagian sekunder transformator dihubungkan dengan lima buah lampu 8W, 50V yang disusun paralel. Jika efisiensi transformator 80% dan lampu-lampu menyala normal, kuat arus primernya adalah
- 0,16 A
 - 0,4 A
 - 0,5 A
 - 0,8 A
 - 1,25 A
25. Hambatan R , induktor L , dan kapasitor C masing-masing memiliki nilai 300Ω , $0,9$ H, dan 2 F. Jika ketiga komponen listrik tersebut dihubungkan seri dan diberi tegangan efektif AC sebesar 50 V sedangkan frekuensi sudut AC 1.000 rad/s maka
- impedansi rangkaian 500 ohm.
 - arus efektif rangkaian $0,1$ A.
 - tegangan yang melintasi L adalah 90 V.
 - tegangan yang melintasi C adalah 50 V.
- Pernyataan yang benar adalah
- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4

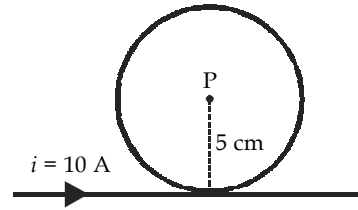
B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Cahaya putih yang mengandung panjang gelombang dari 400 nm sampai dengan 750 nm jatuh pada kisi difraksi dengan 7.500 garis/cm. Jika layar berada pada jarak $2,3$ m di belakang kisi, berapakah lebar spektrum orde pertama?
- Gelombang air laut menyebabkan permukaan air naik turun dengan periode 2 detik. Jika jarak antardua puncak gelombang 5 meter, berapakah waktu yang diperlukan gelombang untuk mencapai jarak 10 meter?
- Dua buah muatan listrik (Q_1 dan Q_2) terpisah pada jarak r . Gaya interaksi antarmuatan tersebut adalah F . Tentukanlah besar gaya interaksinya
 - jika jaraknya dijadikan jaraknya dijadikan setengah kali semula, muatannya tetap, dan
 - jika kedua muatan masing-masing menjadi dua kalinya, jaraknya tetap.
- Diketahui modulus elastisitas dan massa jenis granit $4,5 \times 10^{10}$ N/m² dan $2,7 \times 10^3$ kg/m³.
 - Tentukan cepat rambat bunyi dalam granit.
 - Jika frekuensi bunyi tersebut 2.000 Hz, berapa panjang gelombangnya?
- Sebuah muatan titik q diikat oleh seutas tali ringan tak bermassa dan digantung. Posisi muatan menjadi seperti pada gambar akibat adanya medan listrik seragam E . Massa muatan m dan percepatan gravitasi g .



- a. Apakah jenis muatan q ?
 - b. Nyatakan E dalam kaitannya dengan q , m , g , dan θ .
 - c. Jika $|q| = 1 \mu\text{C}$, $m = 20 \text{ g}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\theta = 45^\circ$, berapakah E ?
6. Sebuah kawat yang panjangnya 5 m terikat pada kedua ujungnya. Massa kawat 4 kg dan mengalami gaya 200 N. Ketika kawat digetarkan, terbentuk 8 buah simpul gelombang. Tentukan:
- a. massa per satuan panjang kawat,
 - b. cepat rambat gelombang pada kawat,
 - c. panjang gelombang pada kawat, dan
 - d. frekuensi gelombangnya.
7. Jika dua buah titik, A dan B, memiliki beda potensial sama, apakah ini berarti tidak diperlukan usaha untuk memindahkan sebuah muatan dari titik A ke titik B? Apakah ini menunjukkan bahwa tidak diperlukan gaya untuk memindahkan muatan tersebut?
8. Pada sebuah konser musik *rock*, taraf intensitas yang terukur pada jarak 2,5 m dari pengeras suara adalah 130 dB. Anggap bunyi menyebar ke segala arah.
- a. Tentukan daya output dari pengeras suara.
 - b. Berapakah jarak tempat dari pengeras suara yang taraf intensitasnya 90 dB?

9. Seutas kawat dibentuk sedemikian rupa seperti diperlihatkan pada gambar, tetapi kawat tidak bersinggungan.

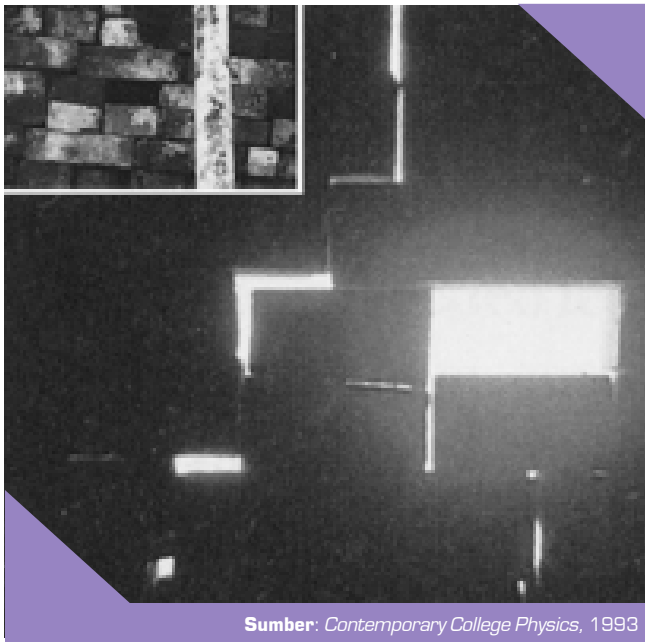


Kawat dialiri arus listrik 10 A dan memiliki jari-jari lingkaran 2,5 cm. Tentukan besar dan arah medan magnet di titik P yang dihasilkan oleh

- a. kawat melingkar,
 - b. kawat lurus, dan
 - c. kedua kawat.
10. Dua sumber bunyi terpisah pada jarak 2 m. Seseorang berdiri pada jarak 3 m dari sumber pertama dan 3,5 m dari sumber kedua.
- a. Berapakah frekuensi minimum bunyi sehingga orang tersebut mendapatkan hasil interferensi minimum?
 - b. Tentukanlah dua nilai frekuensi lain yang juga menghasilkan interferensi minimum di titik tersebut. Cepat rambat bunyi di udara 340 m/s.

B a b 6

Teori Kuantum



Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika modern dengan cara menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat-sifat radiasi benda hitam serta penerapannya.

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya Fisika, terdapat beberapa fenomena yang tidak dapat dijelaskan menggunakan mekanika Newton atau teori elektromagnetik klasik. Fenomena-fenomena tersebut di antaranya radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton. Oleh karena itu, pada permulaan abad ke-20, muncullah sebuah teori baru yang digunakan untuk menjelaskan fenomena-fenomena tersebut. Teori itu dinamakan dengan teori kuantum. Tahukah Anda yang dimaksud dengan teori kuantum?

Berbagai eksperimen dan teori yang dikemukakan oleh para ilmuwan telah berhasil menjawab berbagai pertanyaan yang berhubungan dengan fenomena-fenomena yang berkaitan dengan teori kuantum. Pengamatan eksperimental ini menuju kepada konsep kuantisasi cahaya menjadi foton-foton, dualisme gelombang-partikel, dan sifat gelombang dari partikel.

Pada bab ini, Anda akan mempelajari bagaimana fenomena-fenomena tersebut dapat dijelaskan menggunakan teori kuantum.

- A. Radiasi Benda Hitam**
- B. Efek Fotolistrik dan Teori Foton Einstein**
- C. Efek Compton**
- D. Hipotesis de Broglie**

Soal Pramateri

1. Di Kelas X, Anda telah mempelajari bahwa salah satu cara perpindahan kalor adalah melalui radiasi. Apakah yang Anda ketahui tentang radiasi?
2. Bagaimanakah sifat-sifat gelombang elektromagnetik?
3. Apakah yang Anda ketahui tentang sifat-sifat partikel?

Jelajah Fisika

Joseph Stefan (1835–1893)



Joseph Stefan dilahirkan di daerah pinggiran desa St. Peter dekat Klagenfurt, Austria. Pada 1853, Stefan memasuki Universitas Vienna untuk mendalami Matematika dan Fisika, kemudian lulus pada 1857. Stefan telah memublikasikan hampir 80 artikel dan yang paling terkenal adalah Hukum Fisika Energi pada 1879 yang menjelaskan radiasi benda hitam.

Sumber: www.webenglish.com.tw

A Radiasi Benda Hitam

1. Hukum Stefan-Boltzmann

Pernahkah Anda memerhatikan pijar api? Manakah yang menurut pengamatan Anda lebih panas atau memiliki suhu lebih tinggi, nyala merah atau biru? Untuk merasakan perbedaan panasnya, cobalah Anda lakukan eksperimen sederhana berikut ini secara berkelompok.

Mahir Meneliti

Mengamati Radiasi Panas dari Api

Alat dan Bahan

1. Sebuah lilin
2. Pembakar spiritus
3. Korek api

Prosedur

Lakukan prosedur berikut ini bersama temanmu dengan hati-hati.

1. Siapkan alat dan bahan.
2. Nyalakan lilin dan pembakar spiritus.
3. Perhatikan nyala api dari lilin dan pembakar spiritus. Bagaimanakah nyala api keduanya?
4. Dekatkan tangan kiri Anda pada nyala api lilin, sedangkan tangan kanan Anda pada nyala api pembakar spiritus dengan jarak yang sama (hati-hati, jangan sampai menyentuh apinya).
5. Tangan manakah yang terasa lebih panas?
6. Mengapa nyala api terasa panas meskipun tangan Anda tidak menyentuhnya?
7. Apa yang dapat Anda simpulkan dari kegiatan tersebut?
8. Diskusikan dengan teman kelompok Anda kemudian buatlah laporannya untuk dikumpulkan pada guru Anda.

Anda akan merasakan bahwa api yang menyala biru lebih panas dari pada api yang menyala merah. Panas (energi) dari api sampai ke tangan Anda merambat secara radiasi, yakni perpindahan panas tanpa medium perantara. Apakah hanya api yang meradiasikan panas? Jawabannya, tentu tidak. Setiap benda yang memiliki suhu lebih besar dari lingkungannya akan meradiasikan energi, termasuk tubuh manusia. Panas diradiasikan dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Gelombang tersebut ada yang dapat dilihat keberadaannya dan ada juga yang tidak. Dalam kasus api tadi, gelombang elektromagnetik yang dimaksud adalah cahaya merah dan cahaya biru.

Radiasi energi dari sebuah benda bergantung pada jenis, ukuran, dan suhu benda. **Joseph Stefan** dan **Ludwig Boltzmann** menemukan bahwa laju energi radiasi dari benda sebanding dengan luas permukaan benda dan pangkat empat dari temperatur mutlaknya. Secara matematis, Stefan-Boltzmann merumuskan bahwa laju energi radiasi yang dipancarkan benda memenuhi persamaan

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4 \quad (6-1)$$

dengan: P = laju energi (daya) radiasi (J/s atau watt),

e = emisivitas benda,

σ = konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, dan

T = suhu mutlak benda (K).

A = luas penampang benda yang memancarkan panas (m^2)

Setiap benda memiliki kemampuan meradiasikan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang berbeda-beda. Kemampuan meradiasikan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik disebut *emisivitas*, pada

Ludwig Boltzmann
(1844–1906)



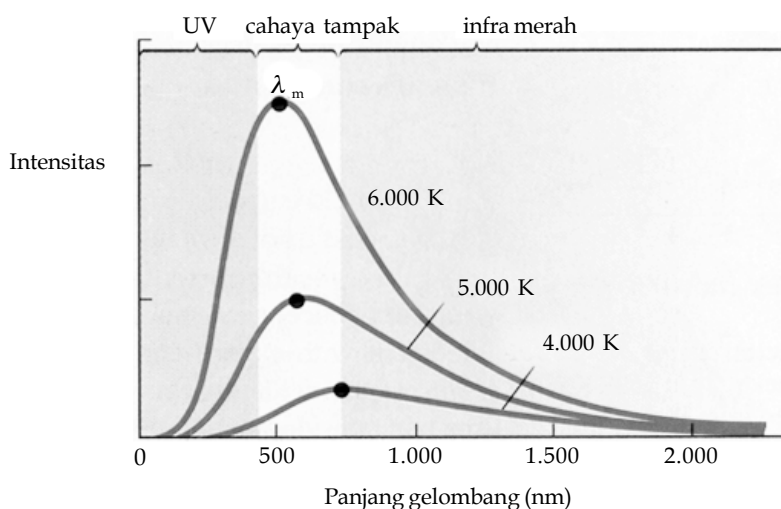
Ludwig Eduard Boltzmann ialah seorang fisikawan Austria. Boltzmann dilahirkan dan menuntut ilmu di Wina. Salah satu usahanya yang luar biasa adalah ketika mengembangkan teori kinetik gas. Salah satu hasil yang diraihnya ialah penafsiran Hukum Kedua Termodinamika.

Sumber: www.wikipedia.org

Persamaan (6-1) diberi simbol e . Nilai emisivitas berkisar dari 0 sampai dengan 1, bergantung pada karakteristik bahan. Permukaan benda yang sangat hitam memiliki emisivitas mendekati 1, sebaliknya benda yang permukaannya mengkilap memiliki emisivitas mendekati nol.

Kemampuan meradiasikan energi sama dengan kemampuan untuk menyerap radiasi energi. Benda hitam memiliki kemampuan meradiasikan dan menyerap energi sangat baik. Sebaliknya, benda mengkilap memiliki kemampuan meradiasikan dan menyerap radiasi energi sangat rendah. Jadi, dapat dikatakan bahwa pemancar energi yang baik juga merupakan penyerap energi yang baik.

Benda yang dapat menyerap semua radiasi yang diterimanya disebut *benda hitam sempurna* (emisivitasnya = 1). Radiasi yang dihasilkan benda hitam sempurna disebut *radiasi benda hitam*. Ketika benda tersebut dipanaskan, energi radiasi akan terpancar dalam bentuk gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang berbeda-beda. **Gambar 6.1** memperlihatkan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh benda hitam sempurna pada beberapa suhu yang berbeda. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa antara panjang gelombang yang diradiasikan dengan suhu benda memiliki hubungan yang sangat rumit.



Sumber: *Contemporary College Physics*, 1993

Gambar 6.1

Spektrum radiasi benda hitam pada tiga suhu berbeda.

Contoh 6.1

Sebuah benda dengan suhu 127°C meradiasikan kalor dengan laju 2 J/s . Berapakah laju radiasi kalor jika suhu benda tersebut 527°C ?

Jawab

Diketahui ketika $T_1 = 127^{\circ}\text{C} + 273 = 400 \text{ K}$, laju radiasi kalor $P_1 = 2 \text{ J/s}$.

$T_2 = 527^{\circ}\text{C} + 273 = 800 \text{ K} = 2 \times 400 \text{ K} = 2 \times T_1$

Oleh karena $P \sim T^4$ dan $T_2 = 2 \times T_1$ maka $P_2 = 2^4 \times P_1 = 16 \times 2 \text{ J/s} = 32 \text{ J/s}$.

Contoh 6.2

Kawat spiral lampu pijar memiliki luas permukaan 40 mm^2 dan bersuhu 727°C . Sebanyak 50% energi listrik pada lampu diubah menjadi panas yang diradiasikan dan emisivitas kawat pijar bersifat seperti benda hitam.

- Tentukan daya yang diradiasikan kawat pijar.
- Berapakah daya listrik pada lampu?
- Jika tegangan pada lampu 220 V , berapakah besar arus yang mengalir pada lampu?

Jelajah Fisika

**Wilhelm Wien
(1864–1928)**



Wilhelm Wien dilahirkan pada 13 Januari 1864. Wilhelm Wien adalah seorang fisikawan berkebangsaan Jerman yang mendapatkan penghargaan nobel di bidang Fisika pada 1911.

Sumber: www.id.wikipedia.org

Jawab

Diketahui: $A = 40 \text{ mm}^2 = 40 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $T = 727^\circ\text{C} + 273 = 1.000 \text{ K} = 10^3 \text{ K}$, emisivitas benda hitam $e = 1$, $P_{\text{radiasi}} = 50\% P_{\text{listrik}}$ dan $V = 220 \text{ V}$.

a. Daya radiasi kawat pijar adalah

$$P_{\text{radiasi}} = e\sigma AT^4 = (1)(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4)(4 \times 10^{-6} \text{ m}^2)(10^3 \text{ K})^4 = 0,23 \text{ W}.$$

b. Oleh karena

$$P_{\text{radiasi}} = 50\% P_{\text{listrik}} = \frac{1}{2} P_{\text{listrik}}$$

maka daya listrik pada lampu adalah

$$P_{\text{listrik}} = 2P_{\text{radiasi}} = 2(0,23 \text{ W}) = 0,46 \text{ W}.$$

c. Arus yang melalui lampu adalah

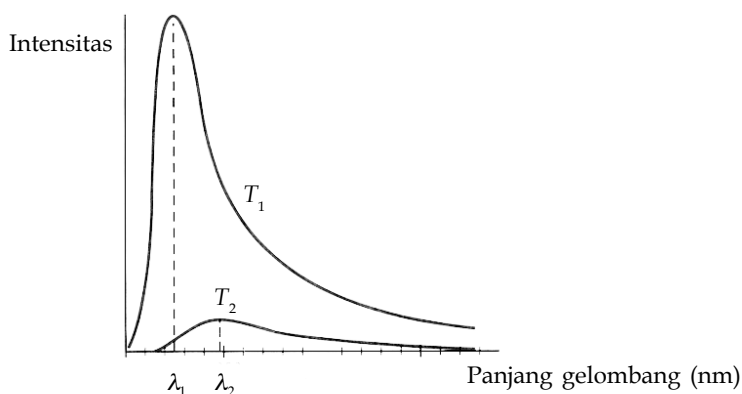
$$i = \frac{P_{\text{listrik}}}{V} = \frac{0,46 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 0,0021 \text{ A} = 2,1 \text{ mA}.$$

2. Hukum Pergeseran Wien

Wilhelm Wien mencoba menemukan hubungan empiris antara panjang gelombang radiasi yang dipancarkan benda hitam dan suhu benda. Wien mengamati bahwa puncak intensitas radiasi pada grafik intensitas terhadap panjang gelombang radiasi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek ketika suhu mutlak bendanya semakin tinggi, seperti diperlihatkan pada **Gambar 6.2**. Akhirnya, Wien menemukan bahwa panjang gelombang radiasi saat intensitasnya maksimum berbanding terbalik dengan suhu mutlak benda. Secara matematis, pernyataan Wien dituliskan sebagai berikut.

$$\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK} \quad (6-2)$$

Persamaan (6-2) dikenal sebagai Hukum Pergeseran Wien.



Gambar 6.2

Pergeseran puncak intensitas radiasi (pergeseran Wien).

Contoh 6.3

Sebuah benda hitam memiliki suhu 2.000 K. Tentukanlah panjang gelombang radiasinya pada saat intensitasnya maksimum.

Jawab

Diketahui: $T = 2.000 \text{ K} = 2 \times 10^3 \text{ K}$.

Panjang gelombang radiasi saat intensitas maksimum adalah

$$\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK} \Rightarrow \lambda_m = \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}}{2 \times 10^3 \text{ K}} = 1,45 \times 10^{-6} \text{ m} = 1,45 \mu \text{ m}.$$

3. Hipotesis Kuantum Planck

Penjelasan ilmiah mengenai radiasi benda hitam dan pergeseran Wien belum terpecahkan hingga tahun 1890-an. Teori Maxwell tentang terjadinya gelombang elektromagnetik yang menyatakan bahwa getaran muatan listrik dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik, ternyata belum mampu memprediksi dengan tepat spektrum yang diradiasikan benda hitam. Ada dua teori klasik yang mencoba untuk menjelaskan radiasi tersebut, yaitu teori Wien dan teori Rayleigh-Jeans. Akan tetapi, Wien hanya berhasil menjelaskan radiasi benda hitam untuk gelombang pendek, sedangkan Rayleigh-Jeans hanya berhasil menjelaskan radiasi benda hitam untuk gelombang panjang.

Kebuntuan teori mengenai radiasi benda hitam akhirnya berhasil dipecahkan oleh **Max Planck**. Akan tetapi, Planck mengemukakan teori baru dengan anggapan yang sangat mengejutkan. Planck menganggap bahwa energi radiasi yang dihasilkan oleh getaran molekul-molekul bermuatan listrik (osilator) merupakan kelipatan bilangan bulat positif dari hf , yaitu

$$E = nhf \quad (6-3)$$

dengan: $n = 1, 2, 3, \dots$,

h = konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ Js, dan

f = frekuensi radiasi (Hz).

Persamaan (6-3) dikenal sebagai *Hipotesis Kuantum Planck*.

Hipotesis Kuantum Planck memperlihatkan bahwa energi radiasi tidaklah kontinu, melainkan terdiri atas paket-paket energi yang diskrit yang disebut *kuanta*. Kuantum energi tersebut diradiasikan jika osilator berubah dari suatu keadaan energi terkuantisasi ke keadaan energi terkuantisasi lainnya. Energi yang diradiasikan saat bilangan kuantumnya (n) berubah adalah

$$\Delta E = \Delta nhf \quad (6-4)$$

Selama osilator tidak mengalami perubahan keadaan kuantisasi, osilator tidak akan meradiasikan energi.

Persamaan (6-4) menyiratkan bahwa energi minimum yang diradiasikan osilator adalah saat keadaan kuantisasinya berubah satu satuan ($\Delta n = 1$), yakni

$$E_0 = \Delta E_{\min} = hf \quad (6-5)$$

Energi minimum (hf) yang diradiasikan osilator disebut dengan *kuantum energi*.

Hipotesis kuantum Planck telah berhasil memadukan teori Wien dan Rayleigh-Jeans. **Gambar 6.3** memperlihatkan perbandingan teori Wien, Rayleigh-Jeans, dan Max Planck untuk menjelaskan radiasi benda hitam. Akan tetapi, meskipun berhasil menjelaskan radiasi benda hitam, hipotesis kuantum Planck tidak begitu menarik bagi para ilmuwan sebelum Einstein menggunakannya untuk menjelaskan efek fotolistrik.

Contoh 6.4

Benda hitam meradiasikan cahaya dengan frekuensi 5×10^{14} Hz. Tentukan energi minimum osilator yang memancarkan cahaya tersebut.

Jawab

Diketahui: $f = 5 \times 10^{14}$ Hz. Dari **Persamaan (6-5)**, diperoleh

$$E_0 = hf = (6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})(5 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3,32 \times 10^{-20} \text{ J}.$$

Kata Kunci

- Emisivitas
- Hipotesis kuantum Planck
- Hukum Pergeseran Wien
- Hukum Stefan-Boltzmann
- Kuantum
- Radiasi benda hitam

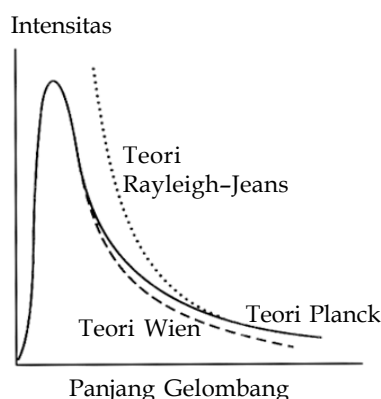
Jelajah Fisika

**Max Planck
(1858–1947)**



Max Karl Ernest Ludwig Planck adalah salah seorang fisikawan Jerman yang paling penting pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20. Planck dianggap sebagai penemu teori kuantum.

Sumber: www.id.wikipedia.org



Gambar 6.3

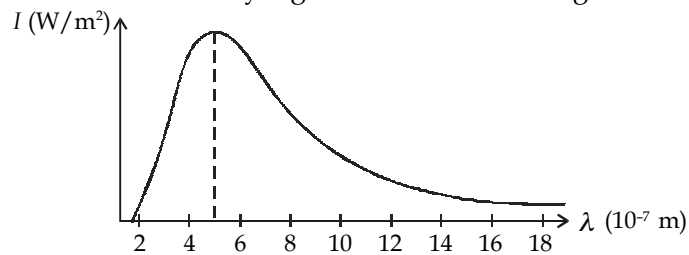
Perbandingan teori Wien, Rayleigh-Jeans, dan Max Planck mengenai radiasi benda hitam.

4. Pengukuran Suhu Matahari Dengan Menerapkan Konsep Radiasi Benda Hitam

Pernahkah Anda berpikir dari manakah energi Matahari berasal dan bagaimana cara mengukur suhu permukaan Matahari? Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan Bumi dan memancarkan energi dalam bentuk kalor yang sangat berguna bagi kehidupan di Bumi. Energi yang dipancarkan oleh Matahari berasal dari reaksi fusi inti atom hidrogen di dalam inti Matahari. Matahari dan Bumi berjarak sekitar 150 juta km. Mungkin Anda dapat membayangkan betapa besar energi yang dipancarkan Matahari sehingga dengan jarak 150 juta km dari Bumi energinya dapat sampai di Bumi berupa kalor dan cahaya.

Pada **Gambar 6.4** berikut ini ditunjukkan hasil pengukuran intensitas spektrum radiasi Matahari yang dilakukan di luar angkasa.

Gambar 6.4
Grafik intensitas spektrum radiasi Matahari.



Dari hasil pengukuran spektrum radiasi Matahari yang ditunjukkan pada **Gambar 6.4** di atas dapat diketahui bahwa radiasi yang dipancarkan oleh Matahari memiliki intensitas yang berbeda dan grafik tersebut sangat mirip dengan grafik intensitas radiasi benda hitam. Berdasarkan hal tersebut, para astronom mengasumsikan Matahari sebagai benda hitam dan untuk mengukur suhu di permukaan Matahari digunakan Hukum Pergeseran Wien.

Berdasarkan grafik hasil pengukuran spektrum radiasi Matahari (**Gambar 6.4**) diketahui bahwa intensitas radiasi Matahari maksimum terdapat pada panjang gelombang 5×10^{-7} m atau 5.000 Å (pada daerah panjang gelombang sinar tampak). Oleh karena itu, menurut Hukum Pergeseran Wien diperoleh nilai suhu permukaan Matahari berikut ini.

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{maks}} T &= 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK} \\ T &= \frac{2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}}{5 \times 10^{-7} \text{ m}} \\ T &= 6.000 \text{ K}\end{aligned}$$

Dengan demikian, berdasarkan konsep radiasi benda hitam diketahui bahwa suhu di permukaan Matahari sekitar 6.000 K. Konsep radiasi benda hitam pun dapat digunakan untuk menghitung suhu bintang lainnya dengan terlebih dahulu mengukur serta menganalisis intensitas spektrum radiasi dari bintang tersebut.

Soal Penguasaan Materi 6.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Filamen sebuah lampu pijar memiliki luas permukaan 20 cm^2 dan bersuhu 1.000 K. Diketahui emisivitas filamen 0,5.
 - Tentukan daya radiasi lampu tersebut.
 - Berapakah daya radiasinya jika suhu filamen diturunkan menjadi 227°C ?
- Panjang gelombang cahaya yang diradiasikan benda ketika intensitasnya maksimum adalah 5.800 Å.
 - Berapakah suhu mutlak permukaan benda?
 - Jika suhu mutlak permukaan benda dijadikan dua kali semula, berapakah panjang gelombangnya saat intensitasnya maksimum?
- Sebuah pemancar radio bekerja pada daya 1 kW. Stasiun radio tersebut bekerja pada frekuensi gelombang 100 MHz FM. Diketahui kelajuan gelombang radio sebesar $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 - Tentukan kuantum energi pada gelombang radio tersebut.
 - Berapa jumlah kuantisasi energi pada yang diradiasikan pemancar tiap sekon?

B Efek Fotolistrik dan Teori Foton Einstein

Efek fotolistrik merupakan hasil eksperimen klasik yang menunjukkan sifat kuantisasi cahaya. Ketika cahaya monokromatik dijatuhkan pada sebuah logam dalam ruang hampa, elektron dapat terlepas dari permukaan logam. Gejala terlepasnya elektron dari permukaan logam ketika disinari cahaya atau gelombang elektromagnetik lain disebut *efek fotolistrik*. Elektron yang lepas dari logam akibat efek fotolistrik disebut *fotoelektron*.

Gambar 6.5 memperlihatkan skema perangkat eksperimen efek fotolistrik. Cahaya monokromatik yang dijatuhkan pada pelat logam K (katode) dapat melepaskan fotoelektron dari pelat logam tersebut. Pemberian beda potensial V antara K dan A (anode) menyebabkan fotoelektron bergerak dari K menuju A. Aliran fotoelektron tersebut akan terdeteksi sebagai arus fotolistrik oleh galvanometer G.

Hubungan antara beda potensial V dan arus fotolistrik I diperlihatkan pada **Gambar 6.6**. Ketika beda potensial listrik diperbesar, arus fotolistrik menunjukkan adanya peningkatan. Akan tetapi, ketika beda potensial tersebut terus diperbesar, arus fotolistrik mencapai harga tertentu yang relatif konstan, tidak bergantung pada beda potensial. Muncul dugaan bahwa jika potensial dijadikan nol, arus fotolistrik juga akan nol. Kenyataannya tidak demikian. Bahkan ketika polaritasnya dibalik pun (elektrode A menjadi positif), arus fotolistrik masih tetap ada meskipun pada akhirnya turun perlahan dan menjadi nol ketika beda potensial yang dibaliknya mencapai harga tertentu. Beda potensial yang menyebabkan terhentinya arus fotolistrik disebut *potensial henti*, diberi simbol V_0 .

Pemberian beda potensial terbalik dapat digunakan untuk menentukan energi kinetik fotoelektron. Ketika pelat K menjadi positif, medan listrik akan berarah dari K menuju ke A. Akibatnya, fotoelektron yang bermuatan negatif, akan mendapat gaya Coulomb yang menentang arah geraknya. Lalu, mengapa masih ada fotoelektron yang mencapai pelat A sehingga arus fotolistrik masih terdeteksi? Kenyataan tersebut menunjukkan bahwa fotoelektron memiliki energi kinetik yang cukup untuk menentang gaya listrik. Baru ketika potensial terbalik ini terus diperbesar, arus fotoelektron terhenti. Ini berarti beda potensial yang diberikan telah memberikan energi potensial yang cukup untuk menghentikan fotoelektron. Besar energi potensial tersebut adalah eV_0 .

Ketika fotoelektron terhenti, sesuai dengan Hukum Kekekalan Energi diperoleh

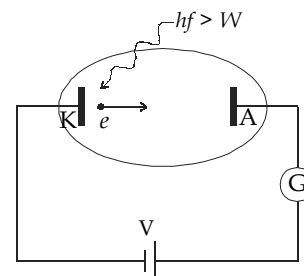
$$EK_{\text{maks}} = eV_0 \quad (6-6)$$

dengan: EK_{maks} = energi kinetik maksimum fotoelektron,

e = muatan elektron = $-1,6 \times 10^{-19}$ C, dan

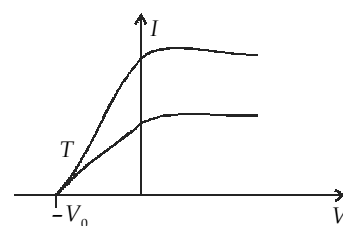
V_0 = potensial henti (V).

Eksperimen efek fotolistrik menunjukkan bahwa elektron terikat pada logam, tetapi dapat lepas ketika elektron mendapatkan energi yang cukup. Namun demikian, ada fakta yang mengejutkan dari eksperimen tersebut. Ketika pelat logam disinari cahaya dengan panjang gelombang relatif panjang (umumnya lebih dari 400 nm), efek fotolistrik tidak terjadi meskipun intensitas cahayanya diperbesar. Kenyataan ini bertolak belakang dengan teori gelombang yang menyatakan bahwa seharusnya, semakin besar intensitas cahaya, semakin banyak elektron yang dilepaskan dan energi kinetik maksimumnya pun semakin besar. Teori gelombang juga menyatakan bahwa seharusnya frekuensi cahaya tidak memengaruhi energi kinetik maksimum fotoelektron, hanya intensitas cahaya yang memengaruhinya. Namun,



Gambar 6.5

Skema perangkat eksperimen efek fotolistrik.



Gambar 6.6

Hubungan antara beda potensial dan arus fotolistrik.

Jelajah Fisika

**Heinrich Hertz
(1857–1894)**



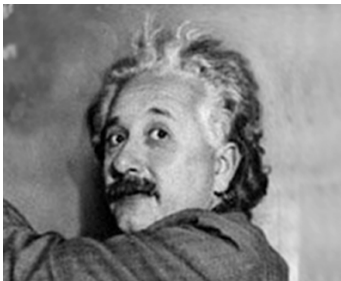
Dari 1885 sampai 1889, fisikawan Jerman, Heinrich Hertz, melakukan sejumlah percobaan yang salah satunya adalah menyelidiki efek fotolistrik. Hertz menyimpulkan bahwa radiasi berlangsung dalam paket-paket tertentu.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Jelajah

Fisika

Albert Einstein
(1879–1955)



Fisikawan Jerman Albert Einstein dilahirkan pada tahun yang bersamaan dengan wafatnya James Clerk Maxwell. Walaupun kepandaianya tidak menonjol di sekolah, Einstein adalah seorang jenius yang mengubah wajah ilmu pengetahuan.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

kenyataannya justru semakin besar frekuensi cahaya, semakin besar pula energi kinetik maksimum fotoelektron. Kenyataan lain yang juga tidak dapat dijelaskan oleh teori gelombang adalah tidak ada selang waktu antara penyinaran logam dan lepasnya elektron dari logam, bahkan dengan intensitas rendah sekalipun. Kenyataan-kenyataan tersebut menunjukkan bahwa efek fotolistrik tidak dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai gelombang.

Untuk menjelaskan fenomena tersebut, **Albert Einstein** mengajukan teori foton dari cahaya. Teori foton cahaya didasarkan pada Hipotesis Kuantum Planck yang menyatakan bahwa energi getaran molekul dari benda yang meradiasikan energi terkuantisasi dengan energi nhf , seperti telah diberikan pada **Persamaan (6-3)**. Menurut Einstein, ketika osilator molekul meradiasikan cahaya, energi osilator tersebut berkurang sebesar hf , $2hf$, atau $3hf$, dan seterusnya. Oleh karena energi bersifat kekal, cahaya yang dipancarkan osilator tersebut haruslah tersusun atas paket-paket energi yang terkuantisasi. Paket-paket energi yang terkuantisasi ini disebut *kuanta* atau *foton* dan memiliki energi sebesar

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (6-7)$$

dengan: E = energi foton (J),
 h = konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ Js,
 f = frekuensi cahaya (Hz),
 c = kecepatan cahaya = $3,0 \times 10^8$ m/s, dan
 λ = panjang gelombang cahaya (m).

Melalui teori foton, Einstein berhasil menjelaskan fenomena yang terjadi pada efek fotolistrik yang selama ini tidak dapat dijelaskan menggunakan teori gelombang. Menurut teori, ketika cahaya dijatuhkan pada logam, foton-foton yang berinteraksi dengan elektron akan memberikan seluruh energinya pada elektron. Sebuah foton hanya berinteraksi dengan sebuah elektron. Dengan kata lain, energi yang diterima sebuah elektron hanya berasal dari sebuah foton. Dengan demikian, energi kinetik maksimum sebuah fotoelektron tidak bergantung pada intensitas cahaya atau jumlah foton, tetapi bergantung pada frekuensi cahaya. Intensitas cahaya atau jumlah foton hanya akan meningkatkan arus fotoelektron karena semakin banyak foton yang berinteraksi dengan elektron, semakin banyak pula elektron yang lepas dari logam.

Ketika elektron logam menerima energi dari foton, elektron akan melepaskan diri dari logam. Jika masih ada sisa energi, elektron akan bergerak dengan energi kinetik maksimum tertentu. Energi foton minimum untuk melepaskan elektron dari logam disebut *energi ambang* atau *fungsi kerja*. Sesuai dengan Hukum Kekekalan Energi, energi kinetik maksimum fotoelektron sama dengan energi foton dikurangi energi ambang, atau secara matematis

$$EK_{\text{maks}} = hf - W \quad (6-8)$$

dengan: EK_{maks} = energi kinetik maksimum fotoelektron, (J)
 hf = energi foton (J), dan
 W = energi ambang atau fungsi kerja. (J)

Persamaan (6-8) menunjukkan bahwa ketika foton hanya mampu melepaskan elektron ($EK_{\text{maks}} = 0$) maka berlaku

$$W = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \quad (6-9)$$

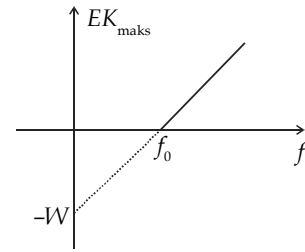
dengan: f_0 = frekuensi ambang atau frekuensi foton minimum (Hz),
 λ_0 = panjang gelombang ambang atau panjang gelombang maksimum (m).

Kata Kunci

- Efek fotolistrik
- Energi ambang
- Fotoelektron
- Foton
- Fungsi kerja
- Potensial henti

Persamaan (6-8) juga menunjukkan bahwa efek fotolistrik hanya akan terjadi jika energi foton lebih besar dari atau minimum tepat sama dengan energi ambang. Jika energi foton lebih kecil dari pada energi ambang, efek fotolistrik tidak akan terjadi.

Gambar 6.7 memperlihatkan grafik hubungan antara energi kinetik maksimum fotoelektron dan frekuensi cahaya yang digunakan. Grafik memotong sumbu frekuensi (f) pada frekuensi ambang (f_0). Jika grafik tersebut diekstrapolasikan (garis putus-putus) ke sumbu energi kinetik maksimum (EK_{maks}), diperoleh energi ambang W . Gradien dari grafik tersebut tidak lain adalah konstanta Planck (h). Grafik ini juga menunjukkan bahwa efek fotolistrik terjadi untuk $f \geq f_0$.



Gambar 6.7

Grafik energi kinetik maksimum fotoelektron terhadap frekuensi cahaya.

Contoh 6.5

Seberkas sinar dengan frekuensi 10^{15} Hz dijatuhkan pada logam. Fungsi kerja logam $2,9 \times 10^{-19}$ J. Tentukan:

- frekuensi ambang foton,
- energi kinetik maksimum fotoelektron, dan
- beda potensial henti elektron.

Jawab

Diketahui: $f = 10^{15}$ Hz dan $W = 2,90 \times 10^{-19}$ J.

- Dari **Persamaan (6-9)**, frekuensi ambang foton adalah

$$f_0 = \frac{W}{h} = \frac{2,9 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}} = 4,37 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

- Energi kinetik maksimum fotoelektron adalah

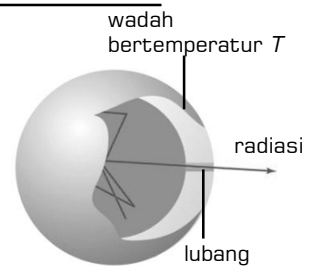
$$EK_{maks} = hf - W = (6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})(10^{15} \text{ Hz}) - (2,90 \times 10^{-19} \text{ J}) = 3,73 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

- Dari **Persamaan (6-6)**, beda potensial henti adalah

$$V_0 = \frac{EK_{maks}}{e} = \frac{3,73 \times 10^{-19} \text{ Js}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2,33 \text{ V.}$$

Jelajah Fisika

Benda Hitam



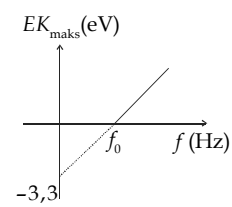
Lubang kecil dari sebuah wadah berongga dan bertemperatur T dapat dianggap sebagai benda hitam. Contohnya adalah lubang pada tungku pembakar keramik.

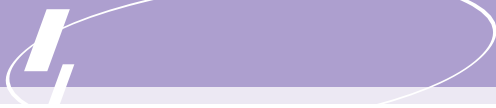
Sumber: www.chem.ncnu.edu.tw

Soal Penguasaan Materi 6.2

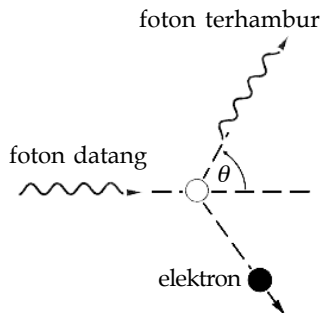
Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Apakah energi kinetik maksimum fotoelektron pada efek fotolistrik bergantung pada intensitas cahaya? Tuliskan alasannya.
 - Gambarkan grafik energi kinetik maksimum fotoelektron terhadap intensitas cahaya.
- Cahaya dengan panjang gelombang 400 nm dijatuhkan pada permukaan aluminium yang fungsi kerjanya 4,2 eV. Diketahui $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 - Tentukan panjang gelombang ambang.
 - Berapakah energi kinetik maksimum fotoelektron?
 - Berapakah beda potensial henti elektronnya?
- Sebuah foton dengan energi 5,8 eV dijatuhkan pada tungsten dengan fungsi kerja 4,5 eV. Diketahui massa dan muatan elektron $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Tentukanlah:
 - energi kinetik maksimum fotoelektron, dan
 - kelajuan maksimum fotoelektron.
- Grafik energi kinetik maksimum fotoelektron terhadap frekuensi foton adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar. Tentukanlah:
 - fungsi kerja dan frekuensi ambang foton, dan
 - energi kinetik maksimum fotoelektron dan beda potensial hentinya saat frekuensi foton yang digunakan $6,0 \times 10^{15} \text{ Hz}$.





C Efek Compton



Gambar 6.8

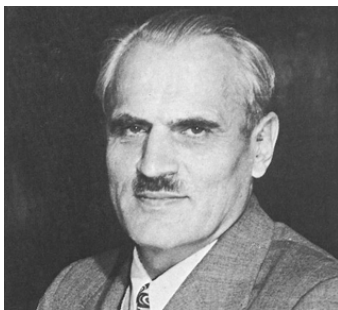
Hamburan Compton.

Kata Kunci

- Efek Compton
- Hamburan foton
- Momentum foton
- Panjang gelombang foton

Jelajah Fisika

Arthur Holly Compton
(1892–1962)



Arthur Holly Compton ialah fisikawan Amerika Serikat yang menerima penghargaan nobel Fisika atas sumbangannya dalam penemuan sebuah efek yang dinamai menurut namanya (efek Compton). Compton dilahirkan di Ohio dan menjalani pendidikan di Wooster College dan Princeton. Saat bekerja di Universitas Washington, St. Louis, ia menemukan bahwa panjang gelombang sinar-X bertambah jika mengalami hamburan dan pada 1923 ia dapat menerangkannya menggunakan teori kuantum cahaya. Sebenarnya, Compton sendirilah yang mengajukan kata "foton".

Sumber: www.id.wikipedia.org

Eksperimen lain yang mendukung teori foton adalah hamburan foton. **A. H. Compton** (1892–1962) menjatuhkan sinar-X pada sebuah elektron bebas, seperti diilustrasikan pada **Gambar 6.8**. Ternyata, sinar-X tersebut dihamburkan dengan sudut θ terhadap arah datangnya. Panjang gelombang sinar-X yang terhambur menjadi lebih besar daripada panjang gelombang semula. Seperti halnya pada efek fotolistrik, kenyataan bahwa panjang gelombang sinar-X yang terhambur menjadi lebih besar tidak dapat dijelaskan menggunakan teori gelombang. Analisis teori gelombang mengharuskan panjang gelombang sinar-X tidak berubah, sementara kenyataannya memberikan hasil yang berbeda.

Compton menjelaskan hasil eksperimennya dengan menganggap sinar-X sebagai kumpulan foton. Foton-foton dalam sinar-X bertumbukan dengan elektron-elektron bebas dan foton-foton itu terhambur. Ketika tumbukan terjadi, foton kehilangan sebagian energinya (diserap elektron). Akibatnya, panjang gelombang foton yang terhambur menjadi besar karena energinya menjadi lebih kecil.

Kenyataan bahwa telah terjadi tumbukan antara foton dan elektron mengharuskan foton memiliki momentum sehingga berlaku Hukum Kekekalan Momentum. Pertanyaannya adalah, berapakah momentum foton? Compton menurunkan momentum foton dari teori relativitas khusus Einstein (dibahas pada Bab 8) dan hasilnya sebagai berikut.

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (6-10)$$

dengan p = momentum foton (Ns).

Dengan menggunakan **Persamaan (6-10)** untuk momentum foton, Compton menerapkan Hukum Kekekalan Momentum dan Energi pada tumbukan antara foton dan elektron. Hasilnya adalah pergeseran panjang gelombang foton memenuhi persamaan

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (6-11)$$

dengan: $\Delta\lambda$ = pergeseran panjang gelombang foton (m),

λ = panjang gelombang foton datang (m),

λ' = panjang gelombang foton hambur (m),

m_0 = massa diam elektron = $9,1 \times 10^{-31}$ kg, dan

θ = sudut hamburan.

Besaran $\frac{h}{m_0c}$ pada **Persamaan (6-11)** disebut *panjang gelombang Compton*.

Contoh 6.6

Tentukan momentum foton yang panjang gelombangnya 600 nm.

Jawab

Diketahui $\lambda = 600 \text{ nm} = 600 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Dari **Persamaan (6-10)**, momentum foton adalah

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{600 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1,11 \times 10^{-27} \text{ Ns}.$$

Contoh 6.7

Berkas sinar-X dengan panjang gelombang $0,010 \text{ \AA}$ disinarkan pada sebuah elektron bebas yang diam. Ternyata, sinar-X tersebut dihamburkan dengan sudut 60° .

- Tentukan panjang gelombang sinar-X yang dihamburkan.
- Berapakah energi yang diterima elektron?

Jawab

Diketahui: $\lambda = 0,01 \text{ \AA} = 10^{-12} \text{ m}$ dan $\theta = 60^\circ$.

- Dari **Persamaan (6-11)**, panjang gelombang sinar-X yang dihamburkan adalah

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = (10^{-12} \text{ m}) + \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} \left(1 - \frac{1}{2}\right) = 2,2 \times 10^{-12} \text{ m}.$$

- Energi yang diterima elektron adalah selisih energi foton sinar-X yang datang dan yang terhambur, yaitu

$$\Delta E = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = (6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \left(\frac{1}{10^{-12} \text{ m}} - \frac{1}{2,2 \times 10^{-12} \text{ m}} \right) = 1,02 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Soal Penguasaan Materi 6.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Seberkas gelombang elektromagnetik memiliki frekuensi $4,4 \times 10^{15} \text{ Hz}$. Tentukanlah momentum setiap foton dalam berkas gelombang tersebut.
- Tentukan panjang gelombang Compton.
 - Jika pergeseran panjang gelombang foton pada efek Compton dua kali panjang gelombang Compton, berapakah sudut hamburannya?

D Hipotesis de Broglie

Eksperimen efek fotolistrik dan efek Compton telah membuktikan bahwa cahaya terdiri atas partikel-partikel (foton-foton). Lalu, bagaimana dengan peristiwa interferensi dan difraksi cahaya yang telah membuktikan bahwa cahaya merupakan gelombang? Manakah yang benar, cahaya itu gelombang atau partikel? Jawaban dari pertanyaan tersebut sangat dilematis. Keduanya didukung oleh hasil eksperimen yang kuat. Kenyataan ini akhirnya mengantarkan pada sebuah kesimpulan bahwa cahaya memiliki dua sifat, yaitu sebagai gelombang di satu sisi dan sebagai partikel di sisi lainnya. Konsep tersebut dikenal sebagai *dualisme gelombang-partikel*.

Konsep dualisme gelombang-partikel diperluas oleh **Louis de Broglie** (1892–1987) pada 1923. Louis de Broglie menyatakan bahwa jika cahaya dapat bersifat sebagai gelombang dan partikel, partikel pun mungkin dapat bersifat sebagai gelombang. Pernyataan tersebut dikenal sebagai *Hipotesis de Broglie*.

Menurut de Broglie, **Persamaan (6-10)** selain berlaku untuk foton, berlaku pula untuk partikel yang memiliki momentum. Dengan demikian, setiap partikel yang bergerak akan memiliki panjang gelombang sebesar

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (6-12)$$

dengan: λ = panjang gelombang partikel (m),

p = momentum partikel (kgm/s),

m = massa partikel (kg), dan

v = kecepatan partikel (m/s).

Panjang gelombang pada **Persamaan (6-12)** disebut juga panjang gelombang de Broglie.

Hipotesis de Broglie akhirnya mendapat dukungan bukti eksperimen yang dilakukan oleh beberapa ilmuwan. Pada 1927, **C. J. Davisson** dan **L. H. Germer** melakukan eksperimen dengan menghamburkan elektron dari

Kata Kunci

- Dualisme gelombang partikel
- Hipotesis de Broglie

Jelajah Fisika

**Louis de Broglie
(1892–1987)**



Prince Louis-Victor de Broglie dilahirkan di Dieppe, Prancis, pada 15 Agustus 1892. Ia adalah seorang sekretaris tetap di Akademi Sains Prancis dan seorang profesor di Fakultas Sains, Universitas Paris.

Sumber: www.wikipedia.org

permukaan kristal logam dan mengamati bahwa elektron dihamburkan dalam pola puncak yang teratur. Ketika pola puncak tersebut ditafsirkan sebagai pola hasil difraksi maksimum, mereka menemukan bahwa panjang gelombangnya sama dengan panjang gelombang de Broglie. Pada tahun yang sama, **G. P. Thomson** juga melakukan eksperimen dengan susunan peralatan berbeda yang menunjukkan adanya difraksi elektron. Beberapa eksperimen lain juga menunjukkan bahwa proton, neutron, dan partikel-partikel kecil lainnya memiliki sifat gelombang.

Contoh 6.8

Tentukan panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang bergerak dengan kelajuan $7,3 \times 10^5$ m/s. Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31}$ kg.

Jawab

Diketahui: $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg dan $v = 7,3 \times 10^5$ m/s.

Panjang gelombang de Broglie dari elektron adalah

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(7,3 \times 10^5 \text{ m/s})} = 9,98 \times 10^{-10} \text{ m} = 9,98 \text{ \AA}$$

Contoh 6.9

Sebuah elektron dipercepat pada beda potensial V . Jika massa elektron m , muatan elektron e , konstanta Planck h , dan elektron dilepas tanpa kecepatan awal, tentukan panjang gelombang de Broglie minimum elektron.

Jawab

Ketika elektron bermuatan e disimpan pada beda potensial V maka elektron tersebut akan memiliki energi potensial listrik eV . Jika elektron itu dilepas tanpa kecepatan awal, energi potensial diubah menjadi energi kinetik (mirip dengan kasus benda jatuh bebas). Dengan demikian,

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m}$$

maka

$$mv = \sqrt{2meV}$$

sehingga panjang gelombang de Broglie partikel bermuatan yang dipercepat pada beda potensial V sebagai berikut

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Soal Penguasaan Materi 6.4

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah partikel bermassa $1,6 \times 10^{-27}$ kg bergerak dengan kelajuan 2×10^4 m/s. Tentukan panjang gelombang de Broglie partikel tersebut.
- Jika momentum partikel dijadikan dua kali semula, menjadi berapa kali semulakah panjang gelombang de Broglie partikel tersebut?
- Perbandingan massa dua buah partikel adalah 4 : 1. Kedua partikel memiliki energi kinetik yang sama.
 - Berapakah perbandingan panjang gelombangnya?
 - Jika panjang gelombang partikel pertama 5×10^{-12} m, berapakah panjang gelombang partikel kedua?
- Sebuah partikel bermuatan yang dipercepat pada beda potensial 100 V memiliki panjang gelombang de Broglie minimum sebesar $3,5 \times 10^{-10}$ m. Jika beda potensialnya dijadikan 400 V, berapakah panjang gelombang de Broglie minimumnya sekarang?

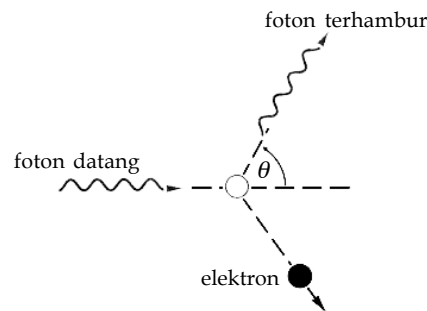
Pembahasan Soal SPMB

Frekuensi foton yang dihamburkan oleh elektron bebas akan lebih kecil dibanding saat datang merupakan hasil dari

- efek fotolistrik
- efek Compton
- produksi pasangan
- produksi sinar-X
- radiasi benda hitam

Penyelesaian

Ketika foton menumbuk elektron, foton menyerahkan sebagian energinya pada elektron sehingga elektron terpental. Akibatnya, energi foton berkurang. Dengan



kata lain, frekuensinya pun akan berkurang. Peristiwa terhamburnya foton oleh elektron bebas ini dikenal sebagai efek Compton.

Jawab: b

SPMB 2005

Rangkuman

- Radiasi energi** dari sebuah benda bergantung pada jenis, ukuran, dan suhu benda. Menurut Joseph Stefan dan Ludwig Boltzmann, laju energi radiasi dari suatu benda sebanding dengan luas permukaan benda dan pangkat empat temperatur mutlaknya.

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$

- Kemampuan meradiasikan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik disebut **emisivitas** (e). Benda yang dapat menyerap semua radiasi yang diterimanya disebut benda hitam sempurna ($e = 1$). Radiasi yang dihasilkan **benda hitam sempurna** disebut **radiasi benda hitam**.
- Wilhelm Wien menemukan bahwa saat intensitasnya maksimum, panjang gelombang radiasi berbanding terbalik dengan suhu mutlak benda.

$$\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

- Max Planck menganggap bahwa energi radiasi yang dihasilkan oleh getaran molekul-molekul bermuatan listrik merupakan kelipatan bilangan bulat positif dari hf .

$$E = nhf$$

- Gejala terlepasnya elektron dari permukaan logam ketika disinari cahaya disebut **efek fotolistrik**. Elektron yang lepas dari logam akibat efek fotolistrik disebut **fotoelektron**.

- Albert Einstein mengajukan teori foton dari cahaya. Teori ini dapat menjelaskan fenomena yang terjadi pada efek fotolistrik, melalui persamaan:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$EK_{\text{maks}} = hf - W$$

- Eksperimen lain yang mendukung teori foton adalah eksperimen hamburan foton yang dilakukan oleh A.H. Compton.

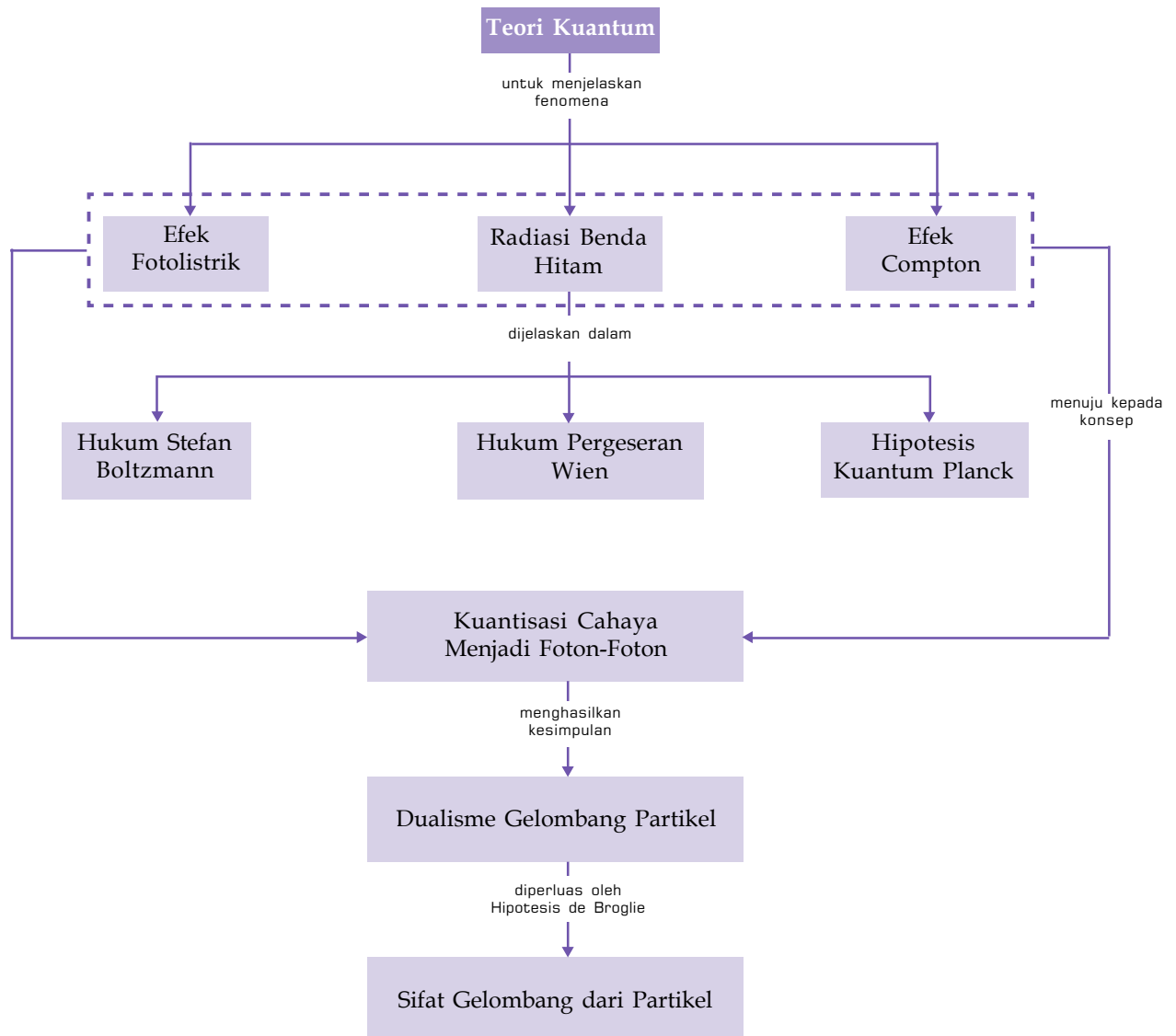
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

- Eksperimen efek fotolistrik dan efek Compton telah membuktikan bahwa cahaya terdiri atas partikel-partikel (foton-foton). Menurut Louis de Broglie, jika cahaya dapat bersifat sebagai gelombang dan partikel, partikel pun mungkin dapat bersifat sebagai gelombang. Pernyataan tersebut dikenal sebagai **Hipotesis de Broglie**.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

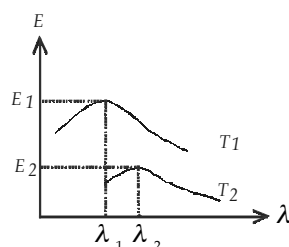
Setelah mempelajari bab Teori Kuantum, Anda dapat menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat-sifat radiasi benda hitam serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Jika Anda belum mampu menganalisa secara kualitatif gejala dan sifat-sifat radiasi benda hitam serta penerapannya, Anda belum menguasai

materi bab Teori Kuantum dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 6

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah lampu memiliki luas permukaan efektif 20 cm^2 . Jika lampu tersebut dianggap sebagai benda hitam, laju energi yang dipancarkan lampu saat suhunya 600 K adalah (Diketahui $\sigma = 5,6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 - $7,3 \text{ W}$
 - $14,5 \text{ W}$
 - $21,9 \text{ W}$
 - 29 W
 - $34,6 \text{ W}$
- Laju energi yang dipancarkan oleh benda bersuhu mutlak K sebanding dengan
 - K^4
 - K^2
 - K
 - $K^{\frac{1}{2}}$
 - $K^{\frac{1}{4}}$
- Laju energi radiasi dari benda yang bersuhu 200 K adalah 20 J/s . Laju energi radiasi dari benda tersebut jika suhunya 400 K adalah
 - 10 J/s
 - 40 J/s
 - 80 J/s
 - 160 J/s
 - 320 J/s
- Panjang gelombang yang dapat dipancarkan benda bersuhu 327°C pada saat intensitas pancarnya maksimum adalah
 - $2,4 \text{ m}$
 - $3,2 \text{ m}$
 - $4,8 \text{ m}$
 - $5,2 \text{ m}$
 - $6,4 \text{ m}$
- Panjang gelombang saat intensitas yang dipancarkan benda hitam maksimum pada suhu T kelvin adalah λ . Jika suhu benda itu dijadikan $2T$ kelvin, panjang gelombang benda itu saat intensitas pancarnya maksimum menjadi
 - $\frac{1}{4} \lambda$
 - $\frac{1}{2} \lambda$
 - λ
 - 2λ
 - 4λ
- Radiasi kalor benda hitam memiliki grafik antara E dan λ , seperti gambar berikut.
 - $E_1 T_1 > E_2 T_2$
 - $T_1 > T_2$
 - $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2}{T_1}$
 - $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{E_2}{E_1}$

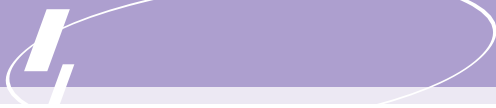


Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4
- Kuantum energi yang terkandung di dalam sinar ultraviolet yang panjang gelombangnya 330 nm adalah (Diketahui konstanta Planck = $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ dan kecepatan cahaya = $3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 - $2 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3,3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $6,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - Suatu antenna stasiun radio bekerja pada daya 990 W dengan frekuensi pancar 100 MHz FM . Jika konstanta Planck = $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$, jumlah foton per detik yang dipancarkan antenna tersebut adalah
 - 1×10^{24}
 - $1,5 \times 10^{24}$
 - 2×10^{24}
 - $2,5 \times 10^{24}$
 - 3×10^{24}
 - Permukaan suatu logam disinari dengan cahaya kuning. Ternyata, penyinaran cahaya kuning itu tidak menghasilkan fotoelektron dari permukaan logam. Upaya yang dapat dilakukan peneliti agar permukaan logam itu menghasilkan fotoelektron adalah
 - mengganti cahaya kuning dengan cahaya biru
 - mengganti cahaya kuning dengan cahaya merah
 - mengurangi ketebalan logam
 - menaikkan intensitas cahaya
 - mengganti logam dengan yang fungsi kerjanya yang lebih besar
 - Hasil percobaan fotolistrik yang tidak dapat dijelaskan oleh Fisika klasik adalah
 - elektron keluar dari katode yang disinari cahaya;
 - tidak keluarnya elektron dari katode yang terbuat dari logam tertentu bila disinari cahaya merah;
 - semakin tinggi intensitas cahaya, semakin banyak elektron yang keluar dari katode;
 - elektron segera keluar dari katode jika disinari cahaya meskipun intensitasnya kecil.

Pernyataan yang benar adalah

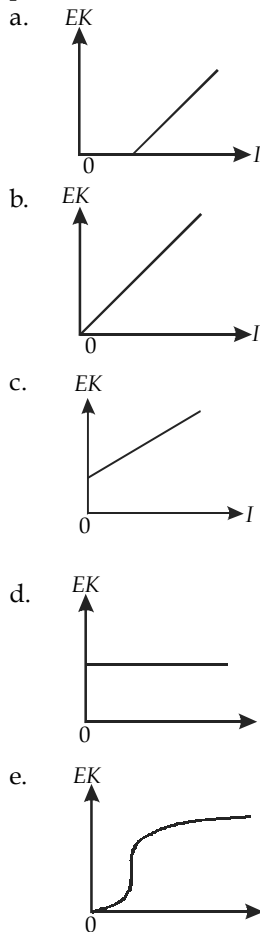
- 1, 2, dan 3
- 1 dan 3
- 2 dan 4
- 4
- 1, 2, 3, dan 4



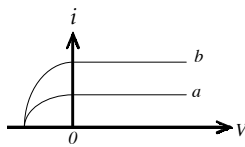
11. Permukaan logam tertentu memiliki fungsi kerja W joule. Jika konstanta Planck h joule sekon maka energi maksimum fotoelektron yang dihasilkan oleh cahaya berfrekuensi f hertz adalah

- a. $W + hf$ joule d. $\frac{hf}{W}$ joule
b. $\frac{W}{hf}$ joule e. $hf - W$ joule
c. $W - hf$ joule

12. Grafik yang menunjukkan hubungan antara energi kinetik fotoelektron (EK) dan intensitas (I) foton pada proses fotolistrik adalah

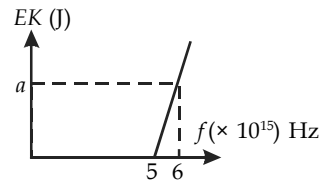


13. Pada gejala fotolistrik, diperoleh grafik hubungan i (kuat arus) terhadap V (tegangan listrik) seperti pada gambar. Upaya yang dapat dilakukan agar grafik a menjadi grafik b adalah



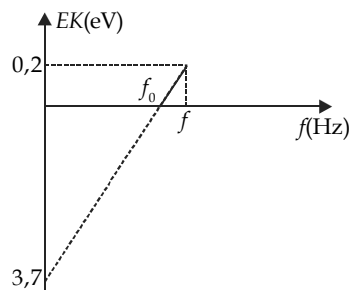
- a. mengurangi intensitas sinarnya
b. menambah intensitas sinarnya
c. menaikkan frekuensi sinarnya
d. menurunkan frekuensi sinarnya
e. mengganti logam yang disinari

14. Gambar berikut adalah grafik hubungan antara energi kinetik maksimum fotoelektron terhadap frekuensi sinar yang digunakan pada efek fotolistrik.



Nilai a pada grafik tersebut adalah ... (Konstanta Planck $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js)

- a. $2,2 \times 10^{-19}$
b. $3,3 \times 10^{-19}$
c. $4,4 \times 10^{-19}$
d. $5,5 \times 10^{-19}$
e. $6,6 \times 10^{-19}$
15. Grafik berikut menunjukkan hubungan antara energi kinetik maksimum elektron (EK) dan frekuensi foton (f) pada efek fotolistrik. Jika diketahui konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js dan $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$ J, besar f adalah



- a. $2,1 \times 10^{14}$ Hz
b. $4,8 \times 10^{14}$ Hz
c. $6,4 \times 10^{14}$ Hz
d. $8,2 \times 10^{14}$ Hz
e. $9,5 \times 10^{14}$ Hz
16. Frekuensi ambang natrium adalah $4,4 \times 10^{14}$ Hz. Besar potensial penghenti elektron saat natrium disinari foton dengan frekuensi $6,0 \times 10^{14}$ Hz adalah (konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js)
- a. 0,34 V
b. 0,40 V
c. 0,44 V
d. 0,66 V
e. 0,99 V
17. Permukaan suatu lempeng logam tertentu disinari dengan cahaya monokromatik. Percobaan ini diulang dengan panjang gelombang cahaya yang berbeda. Ternyata tidak ada elektron yang keluar jika lempeng disinari dengan panjang gelombang di atas 500 nm. Dengan menggunakan panjang gelombang tertentu λ , ternyata dibutuhkan tegangan 3,1 V untuk menghentikan arus fotolistrik yang terpancar dari lempeng. Panjang gelombang λ tersebut adalah
- a. 223 nm d. 384 nm
b. 273 nm e. 442 nm
c. 332 nm

18. Katode pada tabung fotolistrik memiliki frekuensi ambang f_0 . Jika katode disinari dengan cahaya berfrekuensi f , elektron yang keluar dari katode berkecepatan maksimum v_{maks} , dan potensial penghenti yang diperlukan agar arus listrik menjadi nol adalah V_0 . Jarak antara anode-katode d , massa elektron m . Hubungan antara besaran-besaran tersebut sebagai berikut.

1) $V_0 = \frac{1}{2}mv_{\text{maks}}^2$

2) Besarnya perlambatan elektron = $\frac{v_{\text{maks}}^2}{2d}$

3) $f = \frac{e}{h}V_0 - f_0$

4) Kuat medan listrik yang memperlambat $E = \frac{V_0}{d}$

Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, dan 3
- 1 dan 3
- 2 dan 4
- 4
- 1, 2, 3, dan 4

19. Eksperimen Compton menunjukkan bahwa

- foton memiliki momentum;
- energi cahaya terkuantisasi;
- cahaya bersifat sebagai partikel;
- panjang gelombang foton yang dihamburkan menjadi lebih kecil.

Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, dan 3
- 1 dan 3
- 2 dan 4
- 4
- 1, 2, 3, dan 4

20. Pernyataan-pernyataan berikut:

- energi foton tidak bergantung pada intensitas cahaya;
- momentum foton memenuhi $p = \frac{h}{\lambda}$, dengan h tetapan dan λ panjang gelombang cahaya;
- foton tidak dibelokkan oleh medan magnet maupun medan listrik;
- energi yang dibawa oleh tiap foton besarnya $E = \frac{hc}{\lambda}$.

Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, dan 3
- 1 dan 3
- 2 dan 4
- 4
- 1, 2, 3, dan 4

21. Panjang gelombang elektron yang bergerak dengan kecepatan 1×10^6 m/s adalah (Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan konstanta Planck $6,63 \times 10^{-34}$ Js)

- $3,2 \times 10^{-10}$ m
- $4,8 \times 10^{-10}$ m

- $5,9 \times 10^{-10}$ m
- $6,6 \times 10^{-10}$ m
- $7,3 \times 10^{-10}$ m

22. Pada efek Compton, foton yang menumbuk elektron mengalami perubahan panjang gelombang sebesar

- $\frac{h}{(2m_0c)}$, dengan h konstanta Planck, m_0 massa diam elektron, dan c kecepatan cahaya. Besar sudut hamburan yang dialami foton tersebut adalah ...
- 30°
- 60°
- 90°
- 120°
- 180°

23. Massa partikel A 4 kali massa partikel B dan kecepatan partikel A $\frac{1}{3}$ kali kecepatan B, maka perbandingan panjang gelombang partikel A dan panjang gelombang partikel B adalah

- 1 : 4
- 4 : 1
- 3 : 4
- 4 : 3
- 1 : 12

24. Sebuah elektron dipercepat oleh beda potensial V . Jika m = massa elektron, e = muatan elektron, dan h = konstanta Planck, panjang gelombang de Broglie untuk elektron ini dapat dinyatakan dengan hubungan

- $\frac{h}{\sqrt{meV}}$
- $\frac{h}{2\sqrt{meV}}$
- $\frac{h}{\sqrt{2meV}}$
- $\frac{h}{3\sqrt{2meV}}$
- $\frac{h}{\sqrt{3meV}}$

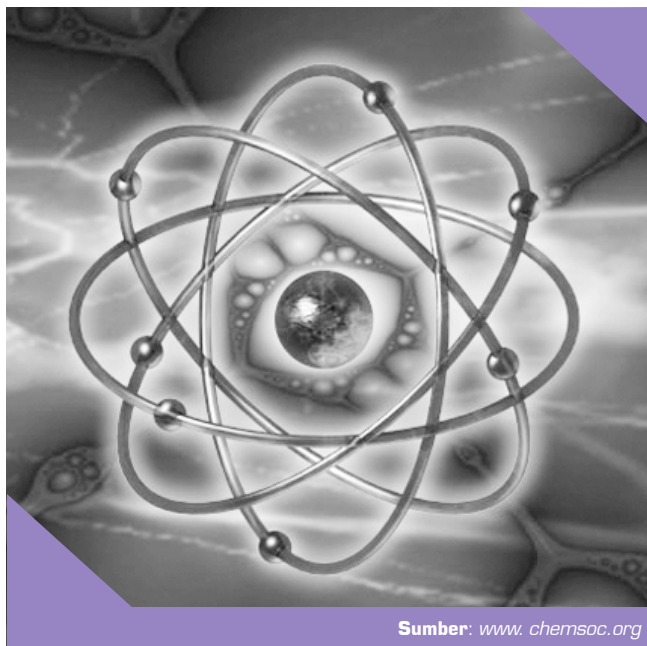
25. Jika dari keadaan diamnya elektron dipercepat berturut-turut oleh beda potensial 50 volt dan 200 V, perbandingan panjang gelombang de Broglienya adalah

- $\frac{1}{4}$
- $\frac{1}{2}$
- $\frac{3}{4}$
- $\frac{1}{2}$
- 4



B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Di antara benda yang memancarkan sinar hijau dan biru, benda manakah yang suhunya lebih tinggi? Mengapa?
2. Teori Dentuman Besar yang menyatakan bahwa asal-usul jagat raya berasal dari ledakan besar berkaitan dengan semburan foton-foton. Foton-foton tersebut hingga saat ini masih dipancarkan dan diyakini berasal dari pusat radiasi yang disebut lubang hitam. Jika temperaturnya 2,7 K, berapa panjang gelombang radiasi ini pada intensitas maksimumnya?
3. Puncak intensitas radiasi cahaya dari benda hitam bergeser ke kiri pada grafik intensitas radiasi terhadap panjang gelombangnya. Apakah kesimpulan Anda tentang suhu benda hitam tersebut?
4. Sebanyak 44% energi lampu pijar 100 W diubah menjadi cahaya pada panjang gelombang 600 nm dan sisanya diubah menjadi panas. Anggaplah luas permukaan lampu 10^{-3} m^2 .
 - a. Jika lampu berperilaku sebagai benda hitam, berapakah suhu lampu?
 - b. Berapakah energi cahaya yang dipancarkan tiap detik?
 - c. Tentukan jumlah foton dalam cahaya tersebut tiap detik.
5. Apakah intensitas cahaya pada efek fotolistrik berpengaruh terhadap lepas tidaknya fotoelektron dari logam? Mengapa?
6. Fungsi kerja barium adalah 2,48 eV.
 - a. Nyatakan fungsi kerja tersebut dalam satuan joule.
 - b. Tentukan frekuensi minimum foton untuk melepaskan elektron dari permukaan barium.
 - c. Berapakah energi kinetik maksimum fotoelektron jika barium disinari foton dengan panjang gelombang 390 nm?
 - d. Tentukan beda potensial penghentinya.
7. Manakah di antara pernyataan berikut yang benar berkaitan dengan efek fotolistrik?
 - a. Energi kinetik fotoelektron tidak bergantung pada intensitas cahaya.
 - b. Arus fotolistrik akan meningkat jika frekuensi cahaya diperbesar.
 - c. Efek fotolistrik terjadi jika cahaya memiliki energi yang lebih besar daripada fungsi kerja logam.
8. Sinar-X dengan panjang gelombang 0,1 nm dihamburkan oleh elektron bebas yang semula diam.
 - a. Hitunglah pergeseran panjang gelombang foton yang terdeteksi pada sudut hamburan 90° .
 - b. Berapakah energi foton yang diserap elektron yang terhambur?
 - c. Berapakah kecepatan elektron yang terhambur?
9. Mengapa cahaya dapat dikatakan memiliki sifat gelombang dan sifat sebagai partikel?
10. Diketahui massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan muatannya $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Hitung panjang gelombang elektron jika energinya:
 - a. 10 eV,
 - b. 100 eV, dan
 - c. 1.000 eV.



Sumber: www.chemsoc.org

7

B a b 7

Teori dan Model-Model Atom

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisa besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika modern dengan cara mendeskripsikan perkembangan teori atom.

Anda tentu pernah mendengar kata "atom". Tahukah Anda, apa yang dimaksud dengan atom? Bagaimana perkembangan teori atom hingga saat ini dan peranannya dalam kehidupan ini?

Pemikiran tentang atom telah muncul sejak kurang dari abad ke-5 SM, berawal dari keingintahuan manusia untuk mengenali sifat materi dan menyimpulkan bahwa di balik kerumitan dunia terdapat hal-hal yang benar-benar sederhana. Sekitar 600 SM, Thales menyatakan bahwa materi terbuat dari air. Pada abad ke-5 SM, Empedocles meyakini bahwa semua materi terdiri atas empat unsur dasar, yaitu tanah, air, udara, dan api. Pada abad berikutnya, Aristoteles menambahkan unsur kelima dari langit, yaitu eter.

Perkembangan selanjutnya, sekitar 400 SM, Demokritus (460–370 SM) mengembangkan teori Leucippus yang menyatakan bahwa jika suatu materi dipotong terus-menerus, hasil akhirnya adalah potongan materi yang tidak dapat dipotong lagi. Demokritus menamakan potongan tersebut sebagai atom. Atom berasal dari kata *atomos* (Yunani), artinya tidak dapat dibagi-bagi lagi.

John Dalton (1766–1844) melakukan eksperimen Kimia yang mendukung pemikiran Demokritus. Akan tetapi, pandangan tentang atom mulai berubah sejak ditemukannya elektron oleh J. J. Thomson (1856–1940). Penemuan elektron yang memiliki massa sangat jauh lebih kecil dibandingkan dengan atom, telah mendorong para ilmuwan untuk mendalami dan mengembangkan teori dan model-model atom.

- A. Teori Atom Dalton**
- B. Penemuan Elektron dan Model Atom Thomson**
- C. Model Atom Rutherford**
- D. Spektrum Atom Hidrogen**
- E. Model Atom Bohr**

Soal Pramateri

1. Apakah yang Anda ketahui tentang proton, neutron, dan elektron?
2. Menurut pengetahuan Anda, bagaimanakah susunan proton, neutron, dan elektron di dalam suatu atom?

Jelajah Fisika

**John Dalton
(1766–1844)**



John Dalton adalah seorang ahli meteorologi yang bersemangat dan mengetahui bahwa udara terdiri atas beberapa jenis gas, yaitu oksigen, uap air, karbon dioksida, dan nitrogen. Pada 1808, John Dalton mempublikasikan teori atomnya.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Gambar 7.1

Tabung lecutan gas.

A Teori Atom Dalton

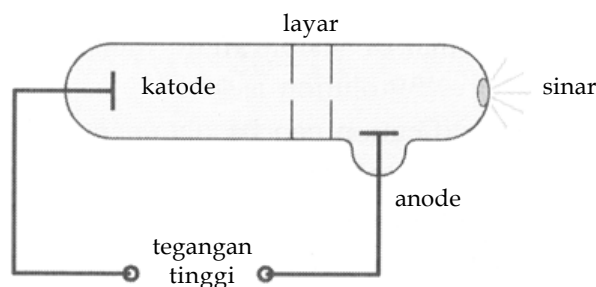
John Dalton (1766–1844) melakukan eksperimen Kimia untuk membuktikan pernyataan **Demokritus**. Hasil eksperimennya telah menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Atom merupakan bagian terkecil suatu unsur yang tidak dapat dibagi-bagi lagi.
2. Atom suatu unsur tidak dapat berubah menjadi atom unsur lain.
3. Atom-atom dapat membentuk molekul.
4. Pada suatu reaksi Kimia, atom-atom berpisah, kemudian bergabung kembali dengan susunan berbeda, tetapi massa keseluruhannya tetap (Hukum Lavoisier).
5. Pada reaksi Kimia, atom-atom bergabung membentuk molekul dengan perbandingan tertentu yang sederhana (Hukum Proust).

Pemikiran bahwa atom merupakan bagian terkecil dari suatu unsur bertahan hingga ditemukannya elektron oleh **J. J. Thomson** (1856–1940).

B Penemuan Elektron dan Model Atom Thomson

Penemuan elektron bermula dari loncatan muatan listrik pada tabung lecutan gas. **Gambar 7.1** memperlihatkan tabung kaca yang hampir hampa udara yang di dalamnya terdapat dua elektrode, yaitu katode (negatif) dan anode (positif). Ketika antara katode dan anode diberi beda potensial yang sangat tinggi, berkas sinar terpancar dari katode. Sinar tersebut dinamakan dengan *sinar katode*.



Membeloknya sinar katode ketika dilewatkan pada medan listrik dan medan magnet mengantarkan pada kesimpulan bahwa sinar katode terdiri atas partikel-partikel bermuatan listrik negatif. Selanjutnya, J.J. Thomson melakukan eksperimen untuk menentukan besar muatan partikel-partikel tersebut. Skema sederhana peralatan eksperimen Thomson diperlihatkan pada **Gambar 7.2**. Sinar katode (digambarkan sebagai sebuah muatan negatif yang besarnya e) dilewatkan pada daerah bermedan listrik (E) dan bermedan magnet (B) yang saling tegak lurus. Akibatnya, sinar katode mendapat gaya listrik ($F_e = eE$) dan gaya magnetik ($F_m = evB$) yang arahnya saling berlawanan. Besar medan magnet diatur sedemikian rupa sehingga besar gaya magnet sama dengan besar gaya listrik ($evB = eE$). Keadaan yang diharapkan terjadi adalah sinar katode merambat lurus dengan kecepatan yang memenuhi persamaan berikut.

$$v = \frac{E}{B}$$



J. J. Thomson sebenarnya bercita-cita menjadi insinyur kereta api, tetapi ternyata ia menjadi ahli Fisika yang hebat. Thomson mempelajari sinar katode dengan gemilang karena mampu mendapatkan gas bertekanan sangat rendah dalam tabung Crookes yang dimodifikasinya sendiri. Hasil penemuan elektron Thomson telah banyak mengubah teori listrik dan atom.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Selanjutnya, sinar katode melewati daerah bermedan magnet saja. Akibatnya, sinar katode akan dibelokkan dan menempuh lintasan melingkar dengan jari-jari R . Dalam hal ini, gaya magnet bertindak sebagai gaya sentripetal sehingga berlaku

$$evB = \frac{mv^2}{R}$$

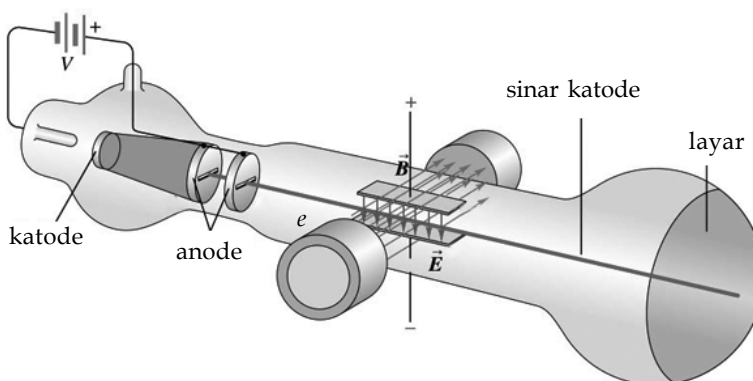
dan diperoleh

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR}$$

Selanjutnya, dengan memasukkan $v = \frac{E}{B}$, diperoleh persamaan berikut

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 R} \quad (7-1)$$

Besaran-besaran E , B , dan R dapat diukur. Akan tetapi, meskipun muatan e dan massa m tidak dapat ditentukan secara terpisah, perbandingan $\frac{e}{m}$ dapat ditentukan. Nilai $\frac{e}{m}$ yang diterima saat ini adalah $1,76 \times 10^{11}$ C/kg. Sinar katode kemudian dikenal sebagai berkas partikel yang disebut *elektron*.



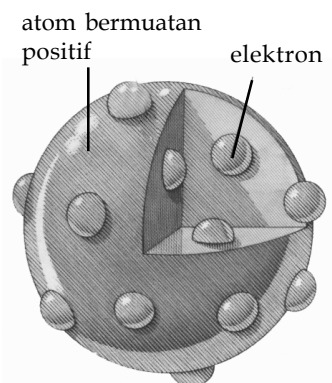
Sumber: www.physics.miami.edu

Meskipun Thomson tidak berhasil menentukan massa dan muatan elektron, tetapi ia yakin bahwa elektron memiliki massa yang jauh lebih kecil dari atom. Berdasarkan keyakinan tersebut, akhirnya Thomson mengemukakan model atomnya. Menurut Thomson, *atom bukanlah bagian terkecil dari suatu unsur, melainkan tersusun oleh muatan-muatan positif (disebut proton) yang tersebar merata di seluruh atom dan dinetralkan oleh elektron-elektron*, seperti diilustrasikan pada **Gambar 7.3**.

Keyakinan Thomson terbukti setelah **R. A. Millikan** (1868–1953) berhasil menentukan muatan elektron melalui eksperimen yang disebut percobaan *tetes minyak Millikan*. Millikan menyemprotkan minyak melalui lubang kecil pada anode, seperti diperlihatkan pada **Gambar 7.4**. Tetes-tetes minyak akan masuk ke daerah bermedan listrik antara anode dan katode. Tetes-tetes minyak tersebut ada yang terus jatuh, ada yang diam, dan ada pula yang bergerak ke atas kembali ke anode. Millikan hanya mengamati tetes-tetes minyak yang diam karena pada keadaan tersebut berlaku persamaan

Gambar 7.2

Skema sederhana eksperimen Thomson.



Sumber: Jendela Iptek, 1977

Gambar 7.3

Model atom Thomson. Proton dan elektron tersebar merata dalam atom.

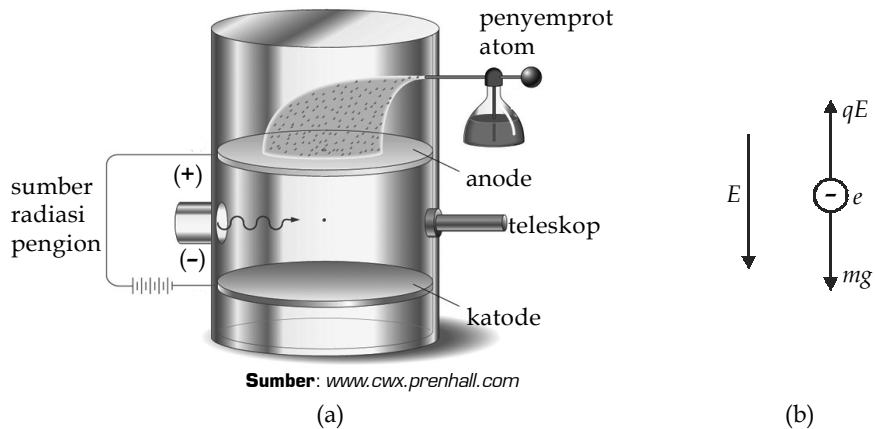


$$qE = mg$$

dengan: q = muatan tetes minyak (C), dan
 g = percepatan gravitasi (m/s^2).

Melalui eksperimen ini, Millikan berhasil menentukan muatan elektron, yaitu $e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Selain itu, Millikan juga menyimpulkan bahwa muatan benda merupakan kelipatan bilangan bulat dari muatan elektron. Selanjutnya, dengan menggunakan **Persamaan (7-1)**, diperoleh massa elektron $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Model atom Thomson diterima secara luas pada tahun 1897 hingga akhirnya **Rutherford** menguji kebenaran model atom tersebut melalui eksperimen yang disebut *hamburan Rutherford*.

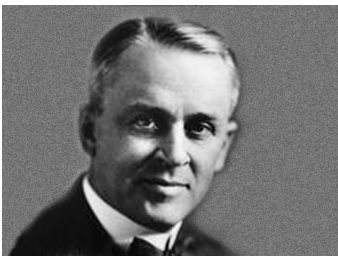


Gambar 7.4

Eksperimen tetes minyak Millikan.

Jelajah Fisika

Robert Andrews Millikan (1868–1953)



Robert Andrews Millikan ialah seorang fisikawan Amerika yang mendapatkan penghargaan nobel Fisika pada 1923 untuk penemuannya tentang muatan elektron dan efek fotolistrik. Pada 1909, Millikan mulai melakukan percobaannya untuk menentukan muatan elektrik yang dibawa oleh elektron tunggal melalui alat percobaannya yang terkenal, tetes minyak Millikan.

Sumber: www.britannica.com

Contoh 7.1

Pada eksperimen Thomson, medan magnet dan medan listrik yang digunakan masing-masing bernilai $2 \times 10^{-4} \text{ T}$ dan $3,52 \times 10^2 \text{ V/m}$. Tentukan jari-jari lintasan

elektron yang terukur sehingga menghasilkan $\frac{e}{m} = 1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.

Jawab

Diketahui: $B = 2 \times 10^{-4} \text{ T}$, $E = 3,52 \times 10^2 \text{ V/m}$, dan $\frac{e}{m} = 1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.

Dari **Persamaan (7-1)**, jari-jari lintasan elektron adalah

$$R = \frac{E}{\left(\frac{e}{m}\right) B^2} = \frac{(3,52 \times 10^2 \text{ V/m})}{(1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg})(2 \times 10^{-4} \text{ T})} = 5 \times 10^{-2} \text{ m} = 5 \text{ cm}$$

Contoh 7.2

Sebuah tetesan minyak mengandung muatan sebesar $3,2 \times 10^{-18} \text{ C}$. Berapakah jumlah elektron dalam tetesan minyak tersebut?

Jawab

Diketahui: muatan tetesan minyak $q = 3,2 \times 10^{-18} \text{ C}$. Menurut hasil eksperimen Millikan, muatan benda merupakan kelipatan bilangan bulat dari muatan elektron $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Jumlah elektron n adalah

$$n = \frac{q}{e} = \frac{3,2 \times 10^{-18} \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 20 \text{ buah.}$$

Jadi, tetesan minyak tersebut mengandung 20 buah elektron.

Soal Penguasaan Materi 7.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

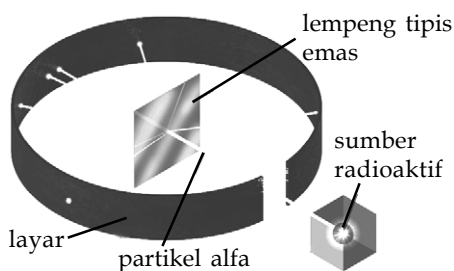
1. Tuliskan pernyataan model atom menurut Dalton.
2. Alasan apa yang mendasari Thomson dalam menyatakan model atomnya?
3. Pada percobaan Thomson, berapakah kelajuan elektron saat melewati medan listrik dan medan magnet jika masing-masing besarnya $5 \times 10^2 \text{ V/m}$ dan $2,5 \times 10^{-4} \text{ T}$?
4. Pada eksperimen tetes minyak Millikan seperti pada **Gambar 7.4**, muatan sebuah tetes minyak yang diamati memiliki massa $4 \times 10^{-15} \text{ kg}$ dan mengandung 5 buah

elektron. Dengan mengatur beda potensial antara dua keping, tetesan minyak tersebut dibuat diam di dalam ruang antara dua keping. Jarak antara dua keping 4,0 cm.

- a. Tentukanlah muatan tetesan minyak.
- b. Berapakah medan listrik antara dua keping?
- c. Tentukanlah beda tegangan antara dua keping.

C Model Atom Rutherford

Ernest Rutherford (1871–1937) melakukan eksperimen untuk menguji kebenaran model atom Thomson. Rutherford menggunakan peralatan seperti diperlihatkan pada **Gambar 7.5**. Pada eksperimen ini, berkas partikel α (alfa), bermuatan positif, ditembakkan pada lempeng tipis emas. Untuk mendeteksi partikel α setelah menumbuk lempeng emas, Rutherford memasang layar yang terlapisi seng sulfida di sekeliling lempeng emas. Hasil pengamatannya menunjukkan bahwa sebagian besar partikel α dengan mudah menembus lempeng tipis emas, sebagian kecil dihamburkan kembali, seolah telah menumbuk "sesuatu yang sangat keras", dan sebagian kecil lainnya dibelokkan. Banyaknya partikel α yang diteruskan dengan mudah mengantarkan pada kesimpulan bahwa sebagian besar ruang dalam atom adalah kosong. Selanjutnya, "sesuatu yang sangat keras" diyakini Rutherford sebagai inti atom yang bermuatan positif, sama dengan jenis muatan partikel α , sehingga ketika partikel α lewat di dekatnya akan ditolak atau dibelokkan.

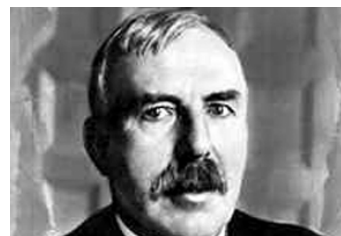


Sumber: www.wps.prenhall.com

Berdasarkan hasil eksperimen tersebut, model atom Thomson yang menyatakan bahwa massa atom tersebar merata di dalam atom tidak dapat diterima lagi. Rutherford mengemukakan teori bahwa atom terdiri atas inti atom dan elektron-elektron bergerak mengitari inti atom dalam orbit lingkaran, seperti diilustrasikan pada **Gambar 7.6**. Massa atom terpusat pada inti dan elektron berada pada jarak yang sangat jauh dari inti. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa jarak antara elektron dan inti atom sekitar 10.000 hingga 100.000 kali jari-jari inti atom. Seandainya inti atom berjari-jari 1 cm (kira-kira

Jelajah Fisika

**Ernest Rutherford
(1871–1937)**

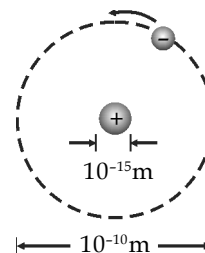


Ernest Rutherford ialah ahli Fisika kelahiran Selandia Baru yang bekerja sama dengan J. J. Thomson di Cambridge. Rutherford adalah orang pertama yang berhasil melakukan pembelahan atom di dalam laboratorium. Ia meraih hadiah nobel Kimia pada 1908 atas penelitiannya dalam berbagai tipe radiasi.

Sumber: www.id.wikipedia.org

Gambar 7.5

Hamburan Rutherford



Gambar 7.6

Model atom Rutherford.



sebesar kelereng kecil), elektron akan mengitari inti atom pada jari-jari 10.000 cm (100 m) hingga 100.000 cm (1 km). Jadi, bisa dibayangkan bahwa sebagian besar ruang dalam atom adalah kosong.

Model atom Rutherford ternyata masih belum sempurna. Kelemahan utama model ini adalah tidak dapat menjelaskan mengapa atom stabil dan mengapa spektrum yang dipancarkan atom hidrogen adalah diskrit.

D Spektrum Atom Hidrogen

Beberapa ilmuwan telah menemukan bahwa atom hidrogen memancarkan spektrum garis (diskrit). **J. J. Balmer** (1825–1898) menemukan bahwa atom hidrogen dapat memancarkan cahaya yang tampak menjadi empat spektrum garis, masing-masing dengan panjang gelombang 410 nm, 343 nm, 486 nm, dan 656 nm. Keempat spektrum garis tersebut ternyata cocok dengan persamaan berikut.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7-2)$$

dengan: λ = panjang gelombang spektrum (m),

R = konstanta Rydberg = $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, dan

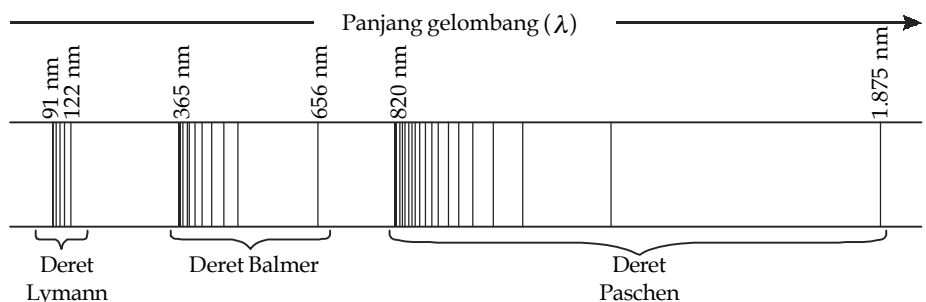
$n = 3, 4, 5, 6, \dots$

Selain Balmer, ada empat ilmuwan lain yang menemukan deret spektrum lain dari atom. Mereka adalah **Lyman**, **Paschen**, **Bracket**, dan **Pfund**. Beberapa deret spektrum itu diperlihatkan pada **Gambar 7.7**. Jika Balmer menemukan deret spektrum atom hidrogen pada daerah cahaya tampak, Lyman menemukan deret spektrum atom hidrogen pada daerah ultraviolet, sedangkan Paschen, Bracket, dan Pfund menemukan deret spektrum atom hidrogen pada daerah inframerah. Secara matematis, kelima deret spektrum hasil penemuan para ilmuwan itu serupa dan dapat dinyatakan dalam bentuk

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) \quad (7-3)$$

dengan ketentuan sebagai berikut.

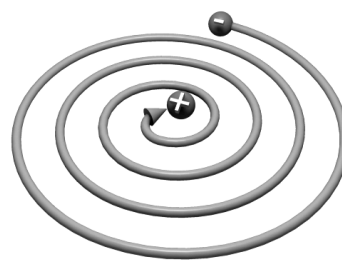
1. Deret Lyman : $n_r = 1$ dan $n_t = 2, 3, 4, \dots, \infty$.
2. Deret Balmer : $n_r = 2$ dan $n_t = 3, 4, 5, \dots, \infty$.
3. Deret Paschen : $n_r = 3$ dan $n_t = 4, 5, 6, \dots, \infty$.
4. Deret Bracket : $n_r = 4$ dan $n_t = 5, 6, 7, \dots, \infty$.
5. Deret Pfund : $n_r = 5$ dan $n_t = 6, 7, 8, \dots, \infty$.



Gambar 7.7

Beberapa deret spektrum atom hidrogen.

inti atom dalam lintasan lingkaran dengan jari-jari orbit tertentu. Oleh karena lintasannya berupa lingkaran, berarti elektron dipercepat dengan percepatan sentripetal yang arahnya menuju ke pusat lingkaran. Menurut konsep gelombang elektromagnetik, percepatan tersebut akan mengakibatkan elektron memancarkan cahaya dan akibatnya energi elektron akan berkurang. Berkurangnya energi elektron ini akan mengakibatkan jari-jari lintasan elektron berkurang sehingga lintasan elektron menjadi berupa spiral menuju inti atom, seperti diilustrasikan pada **Gambar 7.8**. Penjelasan ini mengarah pada prediksi bahwa spektrum yang dipancarkan atom bersifat kontinu, padahal kenyataannya diskrit. Selain itu, atom menjadi tidak stabil karena elektron terus-menerus mendekati inti dan akhirnya dapat bergabung ke dalam inti, sementara kenyataannya atom adalah stabil. Inilah kelemahan model atom Rutherford.



Gambar 7.8

Kelemahan model atom Rutherford, yaitu elektron memancarkan radiasi sehingga energinya berkurang, lintasannya berupa spiral, dan elektron akan bergabung ke dalam inti.

Contoh 7.3

Tentukan dua spektrum dengan panjang gelombang terbesar deret Lyman.

Jawab

Deret Lyman: $n_r = 1$, $n_t = 2, 3$ (dua spektrum dengan panjang gelombang terbesar).

Untuk $n_t = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) = (1,097 \times 10^7 / \text{m}) \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = (1,097 \times 10^7 / \text{m}) \left(\frac{3}{4} \right)$$

sehingga diperoleh

$$\lambda = \frac{4}{(3)(1,097 \times 10^7 / \text{m})} = 1,215 \times 10^{-7} \text{ m} = 1.215 \text{ \AA}.$$

Untuk $n_t = 3$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) = (1,097 \times 10^7 / \text{m}) \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right) = (1,097 \times 10^7 / \text{m}) \left(\frac{8}{9} \right)$$

sehingga diperoleh

$$\lambda = \frac{9}{(8)(1,097 \times 10^7 / \text{m})} = 1,026 \times 10^{-7} \text{ m} = 1.026 \text{ \AA}.$$

Kata Kunci

- Anode
- Atom
- Atom hidrogen
- Elektron
- Katode
- Muatan elektron
- Partikel α

Soal Penguasaan Materi 7.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Tentukan panjang gelombang minimum dari deret:
 - a. Balmer,
 - b. Paschen,
 - c. Bracket, dan
 - d. Pfund.
2. Tentukan panjang gelombang maksimum dari deret:
 - a. Balmer,
 - b. Paschen,
 - c. Bracket, dan
 - d. Pfund.

Niels Bohr
(1885–1962)



Pada 1913, Niels Bohr menjelaskan hubungan antara materi dan cahaya. Bohr menunjukkan bahwa jika elektron-elektron berpindah dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya, elektron-elektron tersebut akan mengeluarkan atau menyerap "paket" radiasi dalam bentuk cahaya. Paket tersebut dinamakan foton atau kuantum. Semakin pendek panjang gelombang radiasi, semakin tinggi energi fotonnya.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

E Model Atom Bohr

Seperti disinggung pada subbab sebelumnya, model atom Rutherford masih menyisakan kelemahan. Kelemahan model atom Rutherford diperbaiki oleh **Niels Bohr** (1885–1962) dengan mengajukan postulat-postulat sebagai berikut.

1. Elektron mengorbit inti atom hanya dalam lintasan lingkaran tertentu.
2. Elektron memiliki energi tertentu pada setiap orbit dan bergerak dalam orbit tanpa meradiasikan energi. Orbit seperti ini disebut orbit stasioner.
3. Energi diradiasikan hanya ketika elektron loncat (bertransisi) dari orbit stasioner satu ke orbit stasioner lainnya yang lebih rendah. Radiasi yang dipancarkan berupa foton tunggal dengan energi

$$hf = E_t - E_r \quad (7-4)$$

dengan E_t dan E_r berturut-turut menyatakan energi orbit yang lebih tinggi dan energi orbit yang lebih rendah.

4. Momentum sudut elektron dalam orbit harus memenuhi keadaan kuantum

$$L = mvr_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (7-5)$$

dengan: L = momentum sudut (Ns),

m = massa elektron = $9,1 \times 10^{-31}$ kg,

r_n = jari-jari orbit ke- n ,

h = konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ Js, dan

n = bilangan kuantum = 1, 2, 3, ...

Bilangan kuantum $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ berkaitan dengan kulit atom K, L, M, N, ... Untuk lebih memahami model atom Bohr, kerjakanlah tugas sederhana berikut, kemudian tuliskan hasilnya di dalam buku Anda.

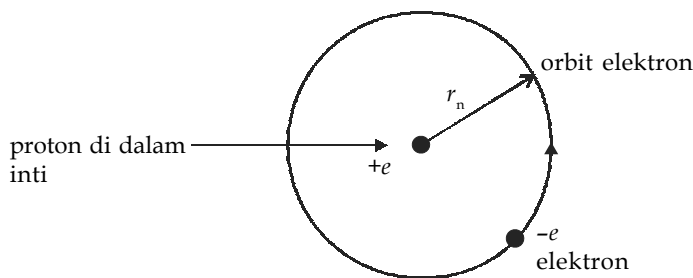
Kerjakanlah

Sediakanlah sebuah balon dan sebuah kelereng kecil. Masukkan kelereng ke dalam balon, kemudian tiuplah balon hingga berdiameter sekitar 15 cm. Putarlah balon dengan kecepatan tertentu sehingga kelereng bergerak melingkar di kulit bagian dalam balon. Jika balon dianggap sebagai sebuah atom dan kelereng dianggap sebagai elektron, kemudian dengan menganggap di pusat balon terdapat suatu inti, atom apakah yang dimaksud? Jika energi putaran balon diperbesar atau diperkecil, apakah yang dapat Anda amati? Apakah kaitannya gejala tersebut dengan kondisi elektron di dalam atom sebenarnya? Kerjakanlah dalam buku tugas Anda, kemudian diskusikan dengan teman-teman dan guru Fisika Anda.

1. Model Atom Hidrogen

Atom hidrogen merupakan atom yang paling sederhana, terdiri atas sebuah proton sebagai inti atom dan sebuah elektron. Sesuai dengan postulat Bohr, elektron mengorbit inti atom dalam lintasan lingkaran, seperti diperlihatkan pada **Gambar 7.9**. Sesuai dengan Hukum Coulomb, besar gaya elektrostatis antara elektron yang bermuatan $-e$ dan inti atom yang bermuatan $+e$ dan terpisah pada jarak r_n adalah

$$F = k \frac{e^2}{r_n^2}$$



Gambar 7.9

Model atom hidrogen.

Gaya elektrostatis tersebut bertindak sebagai gaya sentripetal yang mempertahankan elektron tetap pada orbitnya sehingga diperoleh

$$m \frac{v^2}{r_n} = k \frac{e^2}{r_n^2}$$

atau

$$mv^2 = k \frac{e^2}{r_n} \quad (7-6)$$

Dari postulat Bohr tentang momentum sudut (**Persamaan (7-5)**),

$$v = \frac{nh}{2\pi m r_n}$$

maka **Persamaan (7-6)** menjadi

$$m \left(\frac{nh}{2\pi m r_n} \right)^2 = k \frac{e^2}{r_n}$$

sehingga diperoleh jari-jari orbit pada bilangan kuantum ke- n memenuhi persamaan

$$r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (7-7)$$

Untuk orbit pertama, $n = 1$,

$$\begin{aligned} r_1 &= (1)^2 \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})^2}{(4)(3,14)^2 (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 0,529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,529 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

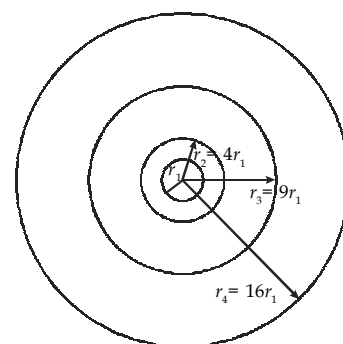
Jari-jari pada orbit pertama ini disebut *jari-jari Bohr*. Dari hasil perhitungan tersebut, jari-jari orbit elektron pada orbit ke- n pada **Persamaan (7-7)** dapat dituliskan menjadi

$$r_n = n^2 r_1 \quad (7-8)$$

Persamaan (7-8) menunjukkan bahwa elektron berada pada orbit tertentu, yakni $r_1, 4r_1, 9r_1, \dots, n^2 r_1$, seperti diperlihatkan pada **Gambar 7.10**. Tidak akan ada elektron yang mengorbit inti atom pada lintasan berjari-jari $2r_1, 3r_1, 5r_1$, atau pada orbit yang bukan kelipatan n^2 dari r_1 .

Selanjutnya, postulat Bohr menyatakan bahwa elektron memiliki energi tertentu pada setiap orbit. Energi tersebut dapat ditentukan sebagai berikut. Dari **Persamaan (7-6)**, energi kinetik elektron dalam orbit adalah

$$EK = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} k \frac{e^2}{r_n}$$

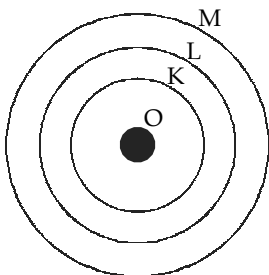


Gambar 7.10

Orbit elektron yang mungkin.

Solusi Cerdas

Perhatikan gambar model atom Niels Bohr di bawah ini. Ketika elektron loncat dari kulit L ke kulit K, atom H memancarkan energi sebesar E .



Energi yang dipancarkan atom H ketika elektron dalam atom H loncat dari kulit M ke kulit K adalah

- $\frac{21}{27}E$
- $\frac{12}{19}E$
- $\frac{24}{27}E$
- $\frac{27}{32}E$
- $\frac{32}{27}E$

Penyelesaian

Diketahui elektron loncat dari kulit L ke kulit K.

Kulit L $\rightarrow n = 2$

Kulit K $\rightarrow n = 1$

$$\Delta E_1 = E_L - E_K = \frac{13,6}{2^2} - \frac{13,6}{1^2} = -10,2 \text{ eV}$$

Elektron loncat dari kulit M ke kulit K.

Kulit M $\rightarrow n = 3$

Kulit K $\rightarrow n = 1$

$$\Delta E_2 = E_M - E_K = \frac{13,6}{3^2} - \frac{13,6}{1^2} = -12,1 \text{ eV}$$

$$\Delta E_1 : \Delta E_2 = 10,2 : 12,1$$

$$E : \Delta E_2 = 102 : 121$$

$$\Delta E_2 = \frac{121E}{102} = \frac{32}{27}E$$

Jawab : e

UN 2004/2005

Sementara itu, dari elektrostatika pada Bab 5, energi potensial listriknya adalah

$$EP = -k \frac{e^2}{r_n}$$

Dengan demikian, energi total elektron adalah

$$E_n = EK + EP = \left(\frac{1}{2} k \frac{e^2}{r_n} \right) - \left(k \frac{e^2}{r_n} \right) = -\frac{1}{2} k \frac{e^2}{r_n}$$

Dari **Persamaan (7-8)**, $r_n = n^2 r_1$, maka

$$E_n = -\frac{1}{2} k \frac{e^2}{n^2 r_1} = -\frac{1}{2} (9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{n^2 (0,529 \times 10^{-10} \text{ m})} = -\frac{2,18 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ joule}$$

Oleh karena $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ atau $1 \text{ J} = 6,25 \times 10^{18} \text{ eV}$, energi elektron pada orbit ke- n memenuhi persamaan

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (7-9)$$

Untuk $n = 1$, $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. Nilai E_1 disebut energi pada keadaan dasar. Tingkat energi yang lebih tinggi, E_2 , E_3 , dan seterusnya, disebut keadaan tereksitasi.

Tanda negatif pada **Persamaan (7-9)** menunjukkan bahwa elektron terikat ke dalam inti. Untuk melepaskan elektron dari orbitnya, diperlukan energi (disebut energi ionisasi) yang sama dengan energi ikat elektron ke dalam inti dan besarnya positif, yakni

$$E_i = \frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (7-10)$$

dengan E_i adalah energi ionisasi.

Ketika elektron loncat dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, foton akan diradiasikan. Seperti yang telah ditulis pada **Persamaan (7-4)**,

$$hf = E_t - E_r \quad (7-11)$$

Oleh karena $f = \frac{c}{\lambda}$ dan dengan memasukkan **Persamaan (7-9)**, kemudian dengan sedikit penyesuaian, **Persamaan (7-11)** menjadi

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{E_1}{n_t^2} - \frac{E_1}{n_r^2} = -E_1 \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right)$$

Dengan demikian, panjang gelombang foton yang diradiasikan adalah

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right)$$

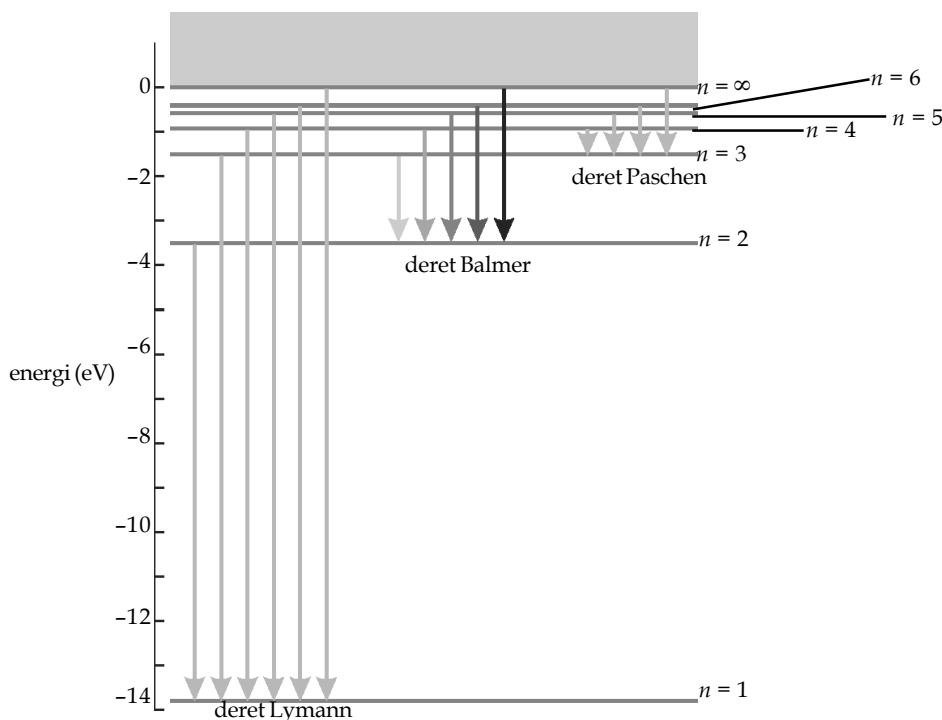
Dalam satuan joule, $E_1 = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$, maka

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= -\frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) = -\frac{(-2,18 \times 10^{-18} \text{ J})}{(6,625 \times 10^{-34} \text{ Js})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) \\ &= (1,097 \times 10^7 / \text{m}) \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) \end{aligned}$$

atau

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right) \quad (7-12)$$

karena besaran $1,097 \times 10^7$ memiliki satuan m^{-1} dan tepat sama dengan konstanta Rydberg (R), seperti yang telah diberikan pada **Persamaan (7-2)** atau **(7-3)**.



Sumber: *Fundamental of Physics*, 2001

Gambar 7.11

Diagram tingkat energi. Spektrum atom terjadi karena adanya loncatan elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah.

Persamaan (7-12) tepat sama dengan **Persamaan (7-3)**. Bohr sukses menjelaskan mengapa spektrum atom hidrogen diskrit. Berdasarkan teori Bohr, spektrum yang dipancarkan atom berasal dari foton yang diradiasikan ketika elektron yang loncat dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi rendah atau dari bilangan kuantum tinggi n_t ke bilangan kuantum rendah n_r , seperti diilustrasikan pada **Gambar 7.11**. Selain itu, Bohr juga sukses menjelaskan spektrum absorpsi, yaitu foton dengan energi yang tepat dapat menyebabkan elektron loncat dari tingkat energi rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi, dikenal sebagai *eksitasi*.

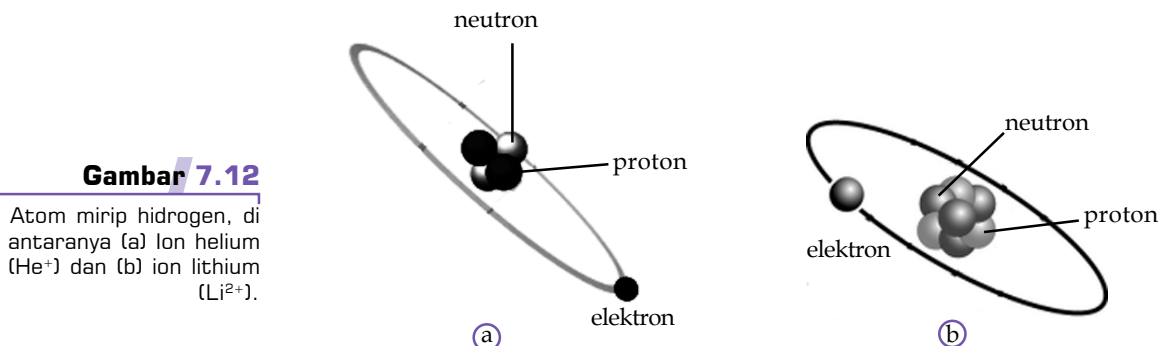
Kesuksesan lainnya, Bohr berhasil menjelaskan mengapa atom dalam keadaan stabil. Bohr juga dengan tepat memprediksi bahwa energi ionisasi atom hidrogen adalah 13,6 eV, sesuai dengan hasil eksperimen. Akan tetapi, teori Bohr masih menyisakan kelemahan, yakni tidak berlaku untuk atom berelektron banyak.

Kerjakanlah

Menurut Anda, apakah yang menyebabkan teori atom Bohr tidak berlaku untuk atom berelektron banyak? Lakukanlah analisis tentang hal tersebut. Anda dapat mencari informasi melalui literatur lain, internet, atau berdiskusi dengan guru Fisika Anda.

2. Atom Mirip Hidrogen

Unsur helium atau lithium dapat kehilangan elektronnya sehingga menyisakan satu elektron, masing-masing menjadi ion He^+ dan ion Li^{2+} , seperti diperlihatkan pada **Gambar 7.12**.



Gambar 7.12

Atom mirip hidrogen, di antaranya (a) ion helium (He^+) dan (b) ion lithium (Li^{2+}).

Inti atom helium memiliki 2 proton, sedangkan inti atom lithium memiliki 3 proton. Ion helium dan ion lithium merupakan dua contoh atom mirip hidrogen. Pada atom-atom seperti ini, teori Bohr dapat digunakan. Perbedaananya dengan atom hidrogen terdapat pada muatan inti atomnya. Secara umum, muatan inti atom adalah Ze , dengan Z adalah jumlah proton dalam inti atom. Melalui penurunan yang mirip dengan yang telah dilakukan untuk atom hidrogen, diperoleh energi elektron pada setiap orbit memenuhi persamaan berikut.

$$E_n = -\frac{13,6 Z^2}{n^2} \text{ eV} \quad (7-13)$$

dengan : n = bilangan kuantum utama yang berkaitan dengan kulit atom.

Contoh 7.4

Jika pada atom hidrogen elektron loncat dari kulit L ke kulit K, tentukanlah:

- energi yang dipancarkan atom hidrogen, dan
- panjang gelombang fotonnya.

Jawab

- Dari **Persamaan (7-10)**, energi elektron pada kedua kulit L ($n = 2$) adalah

$$E_2 = \frac{-13,6}{2^2} = -3,4 \text{ eV},$$

sedangkan energi pada kulit K ($n = 1$) adalah $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. Energi yang dipancarkan ketika elektronnya loncat dari kulit L ke K adalah

$$\Delta E = E_1 - E_2 = (-13,6 \text{ eV}) - (-3,4 \text{ eV}) = -10,2 \text{ eV}.$$

Tanda *negatif* menunjukkan bahwa *energi dipancarkan* oleh atom. Jadi, energi yang dipancarkannya adalah 10,2 eV.

- Dari **Persamaan (7-12)**, untuk $n_r = 1$ dan $n_i = 2$,

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3R}{4}$$

sehingga panjang gelombang fotonnya adalah

$$\lambda = \frac{4}{3R} = \frac{4}{(3)(1,097 \times 10^7 / \text{m})} = 1,215 \times 10^{-7} \text{ m} = 1.215 \text{ \AA}.$$

Soal Penguasaan Materi 7.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Diketahui jari-jari Bohr adalah $0,53 \text{ \AA}$. Tentukanlah jari-jari orbit elektron pada kulit:
 - a. L,
 - b. M, dan
 - c. N.
2. Jika energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar adalah $-13,6 \text{ eV}$, berapakah energi yang diperlukan atom hidrogen agar elektronnya tereksitasi dari tingkat dasar ke kulit M?
3. Dari postulat Bohr tentang momentum sudut tersirat sifat gelombang elektron. Buktikan bahwa panjang gelombang elektronnya memenuhi

$$\lambda = \frac{2\pi r_n}{n}$$

dengan n = bilangan kuantum dan r = jari-jari orbit elektron.

4. a. Tentukan energi dan panjang gelombang foton yang dipancarkan jika elektron bertransisi dari bilangan kuantum tiga ke bilangan kuantum satu.
b. Pada deret apakah panjang gelombang tersebut berada?
5. a. Berapakah energi elektron ion helium ($Z = 2$) pada keadaan dasarnya?
b. Berapakah energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron tersebut?

Pembahasan Soal SPMB

Pernyataan berikut berhubungan dengan pemancaran dan penyerapan energi oleh setiap elektron. Pernyataan yang benar adalah

- a. setiap elektron yang bergerak pada lintasannya selalu memancarkan energi
- b. pada pemancaran dan penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih dalam
- c. pada pemancaran dan penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan luar
- d. pada pemancaran energi, elektron loncat ke lintasan luar, sedangkan pada penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih dalam
- e. pada pemancaran energi, elektron loncat ke lintasan dalam, sedangkan pada penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih luar

Penyelesaian

Proses pemancaran dan penyerapan energi oleh setiap elektron terjadi pada peristiwa transisi elektron di dalam atom. Transisi elektron dijelaskan di dalam postulat Bohr sebagai berikut.

- a. Elektron akan memancarkan energi apabila bertransisi dari kulit luar menuju kulit dalam.
- b. Elektron akan menyerap energi apabila bertransisi dari kulit dalam menuju kulit luar.

Jawab: e

SPMB 2004

Rangkuman

1. Menurut Dalton, atom merupakan bagian terkecil suatu unsur yang tidak dapat dibagi-bagi lagi, tidak dapat berubah menjadi atom unsur lain, dapat membentuk molekul, dapat berpisah dan bergabung kembali dengan susunan berbeda dan massa tetap, serta dapat membentuk molekul dengan perbandingan tertentu yang sederhana.
2. Menurut Thomson, atom bukanlah bagian terkecil dari suatu unsur, melainkan tersusun oleh muatan-muatan positif (proton) yang tersebar merata di seluruh atom dan dinetralkan oleh elektron-elektron.
3. Melalui eksperimennya, Millikan berhasil menentukan muatan elektron, yaitu
$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$
kemudian ia menyimpulkan bahwa muatan benda merupakan kelipatan bilangan bulat dari muatan elektron.
4. Menurut Rutherford, atom terdiri atas inti atom bermuatan positif dan elektron-elektron bermuatan negatif yang bergerak mengitari inti atom dalam orbit lingkaran. Kelemahan model atom Rutherford adalah tidak dapat menjelaskan mengapa atom stabil dan mengapa spektrum yang dipancarkan atom hidrogen adalah diskrit.
5. Balmer menemukan deret spektrum atom hidrogen pada daerah cahaya tampak, Lyman pada daerah ultraviolet, sedangkan Paschen, Bracket, dan Pfund pada daerah inframerah.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_r^2} - \frac{1}{n_t^2} \right)$$

Deret Lyman : $n_r = 1$ dan $n_t = 2, 3, 4, \dots, \infty$.
Deret Balmer : $n_r = 2$ dan $n_t = 3, 4, 5, \dots, \infty$.
Deret Paschen : $n_r = 3$ dan $n_t = 4, 5, 6, \dots, \infty$.
Deret Bracket : $n_r = 4$ dan $n_t = 5, 6, 7, \dots, \infty$.
Deret Pfund : $n_r = 5$ dan $n_t = 6, 7, 8, \dots, \infty$.

6. Berikut adalah **postulat-postulat Bohr**.

- a. Elektron mengorbit inti atom dalam lintasan tertentu.

$$r_n = n^2 r_1$$

- b. Elektron memiliki energi tertentu pada setiap orbit dan bergerak dalam orbit tanpa meradiasikan energi.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

- c. Energi diradiasikan hanya ketika elektron bertransisi dari orbit stasioner satu ke orbit stasioner lain yang lebih rendah.

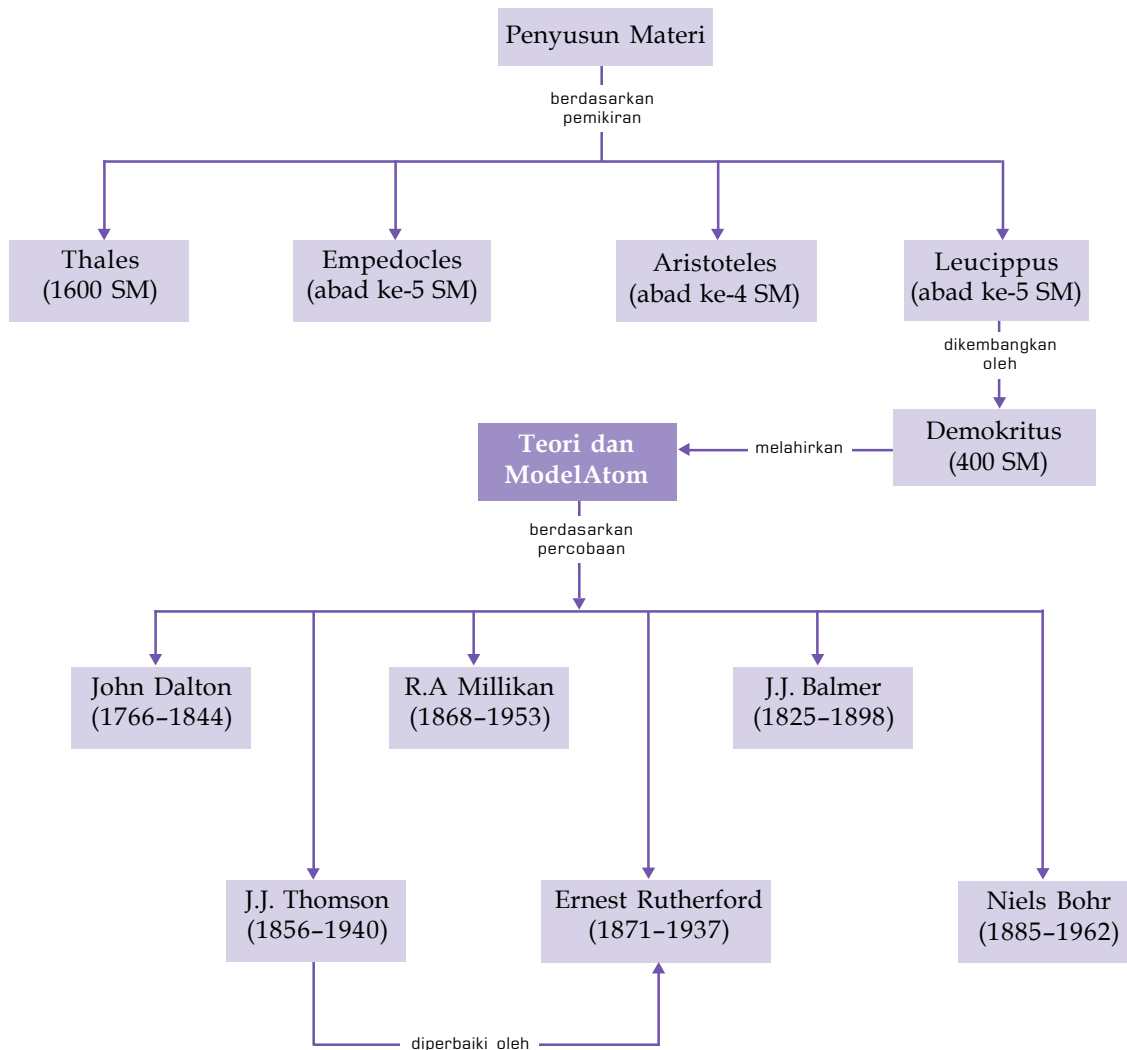
$$hf = E_t - E_r$$

- d. Momentum sudut elektron dalam orbit harus memenuhi keadaan kuantum

$$L = mvr_n = n \frac{h}{2\pi}$$

7. Kesuksesan teori Bohr di antaranya adalah berhasil menjelaskan mengapa spektrum atom hidrogen diskrit, menjelaskan spektrum absorpsi, menjelaskan mengapa atom dalam keadaan stabil, dan berhasil memprediksi dengan tepat bahwa energi ionisasi atom hidrogen adalah 13,6 eV. Kelemahan teori Bohr adalah tidak berlaku untuk atom berelektron banyak.

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Teori dan Model-Model Atom, Anda dapat mendeskripsikan perkembangan teori atom. Jika Anda belum mampu mendeskripsikan perkembangan teori atom, Anda belum menguasai materi bab Teori dan Model-Model Atom dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami,

lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 7

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Salah satu konsep atom menurut Dalton adalah
 - molekul terdiri atas atom-atom
 - massa total atom sebelum dan sesudah reaksi tidak sama
 - atom dapat dibagi-bagi
 - atom hanya dapat bergabung dengan atom lain yang sejenis
 - atom suatu unsur dapat sama dengan atom unsur lainnya
- Menurut Rutherford, sebagian massa atom terpusat pada
 - elektron
 - proton
 - neutron
 - inti atom
 - proton dan elektron
- Ketika sinar α ditembakkan pada lempeng tipis emas, ternyata sebagian besar sinar α menembus lempeng emas tanpa dibelokkan. Hal ini menunjukkan bahwa
 - massa atom tersebar merata ke seluruh isi atom
 - sebagian besar ruang dalam atom adalah ruang kosong
 - atom terdiri atas muatan-muatan positif dan negatif yang saling menetralkan
 - terdapat inti yang bermuatan positif
 - inti atom dan elektron berada pada jarak yang sangat berdekatan
- Kenyataan yang tidak dapat dijelaskan oleh model atom Rutherford adalah
 - atom dapat terionisasi
 - elektron-elektron dapat memancarkan energi
 - terhamburnya partikel-partikel bermuatan bila melalui atom-atom
 - spektrum pancar atom hidrogen berbentuk garis-garis
 - partikel-partikel bermuatan dapat melewati kumpulan-kumpulan atom
- Panjang gelombang foton yang dipancarkan oleh elektron pindah dari kulit M ke kulit K (R = konstanta Rydberg) adalah
 - $\frac{8}{9R}$
 - $\frac{9}{8R}$
 - $\frac{17}{9R}$
 - $\frac{9}{17R}$
 - $\frac{1}{R}$
- Menurut model atom Bohr, elektron bergerak mengelilingi inti hanya pada lintasan tertentu. Besarnya momentum anguler elektron pada lintasan tersebut adalah
 - berbanding terbalik dengan bilangan kuantum
 - berbanding lurus dengan bilangan kuantum
 - berbanding terbalik dengan jari-jari orbit elektron
 - berbanding lurus dengan konstanta Rydberg
 - berbanding terbalik dengan massa elektron
- Apabila elektron pindah dari orbit ketiga ke orbit kedua, foton akan dipancarkan dengan panjang gelombang pada daerah
 - sinar-X
 - sinar tampak
 - sinar ultraviolet
 - sinar α
 - sinar inframerah
- Perhatikan Pernyataan-pernyataan berikut.
 - Elektron bergerak mengelilingi inti atom tanpa membebaskan energi.
 - Energi sebesar hf akan dipancarkan apabila elektron pindah dari orbit dengan energi tinggi ke orbit dengan energi rendah.
 - Elektron hanya menempati lintasan dengan jari-jari sebesar $n^2 r_1$, dengan n bilangan bulat positif dan r_1 jari-jari orbit pertama.
 - Momentum sudut pada tiap orbit sebanding dengan bilangan kuantum orbit tersebut.Pernyataan yang sesuai dengan model atom Bohr adalah
 - 1, 2, dan 3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4
 - 1, 2, 3, dan 4
- Sebuah atom akan memancarkan foton apabila salah satu elektronnya
 - meninggalkan atom itu
 - bertumbukkan dengan elektron lainnya
 - bertukar energi dengan elektron lainnya
 - mengalami transisi ke tingkat energi yang lebih rendah
 - mengalami transisi ke tingkat energi yang lebih tinggi
- Perubahan momentum sudut elektron ketika loncat dari kulit M ke kulit K adalah
 - $1,06 \times 10^{-34} \text{ Ns}$
 - $1,59 \times 10^{-34} \text{ Ns}$
 - $2,11 \times 10^{-34} \text{ Ns}$
 - $3,12 \times 10^{-34} \text{ Ns}$
 - $4,22 \times 10^{-34} \text{ Ns}$
- Radiasi sinar ultraviolet terjadi ketika elektron atom hidrogen bertransisi dari
 - kulit L ke kulit K
 - kulit L ke kulit M
 - kulit K ke kulit M
 - kulit N ke kulit L
 - kulit M ke kulit L

12. Besarnya energi yang dipancarkan oleh atom hidrogen jika terjadi transisi elektron dari orbit dengan bilangan kuantum 2 ke orbit dengan bilangan kuantum 1 adalah
- 1 eV
 - 3,4 eV
 - 6,8 eV
 - 10,2 eV
 - 11,6 eV
13. Pada model atom Bohr, elektron bergerak dengan orbit lingkaran berjari-jari $0,53 \text{ \AA}$ dengan kelajuan $2,2 \times 10^6 \text{ m/s}$. Jika massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan muatan elektron $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, arus listrik pada orbit adalah ...
- 1,06 pA
 - 1,06 nA
 - 1,06 μA
 - 1,06 mA
 - 1,06 A
14. Sebuah atom ada pada keadaan dasar apabila elektronnya
- ada di dalam inti atom
 - lepas dari orbitnya
 - ada pada orbit tertentu
 - ada pada tingkat energi terendah
 - ada pada tingkat energi tertinggi
15. Seberkas cahaya ditembakkan pada sebuah atom sehingga atom tereksitasi 2 eV di atas tingkat dasarnya. Panjang gelombang berkas cahaya tersebut adalah
- 400 nm
 - 460 nm
 - 540 nm
 - 620 nm
 - 730 nm
16. Jika energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar 13,6 eV, energi yang diserap atom hidrogen agar elektronnya tereksitasi dari kulit K ke kulit M adalah
- 6,82 eV
 - 8,53 eV
 - 9,07 eV
 - 10,20 eV
 - 12,10 eV
17. Jari-jari orbit elektron pada keadaan dasar adalah $0,53 \text{ \AA}$. Jari-jari orbit elektron pada orbit dengan bilangan kuantum 3 adalah
- $8,5 \text{ \AA}$
 - $6,4 \text{ \AA}$
 - $4,8 \text{ \AA}$
 - $2,1 \text{ \AA}$
 - $1,1 \text{ \AA}$
18. Perbandingan jari-jari orbit elektron pada kulit K dan kulit M adalah
- 1 : 1
 - 1 : 4
 - 1 : 9
 - 1 : 16
 - 4 : 9
19. Jika laju elektron di kulit L adalah v , laju elektron di kulit M adalah ...
- $\frac{1}{3}v$
 - $\frac{2}{3}v$
 - $\frac{3}{2}v$
 - $\frac{4}{9}v$
 - $\frac{9}{4}v$
20. Elektron atom hidrogen model Bohr mengelilingi intinya dengan bilangan kuantum n . Jika energi ionisasi atom itu bernilai $1 \frac{1}{16}$ kali energi ionisasi pada keadaan dasarnya, nilai n adalah
- 2
 - 4
 - 8
 - 16
 - 32
21. Apabila elektron berada pada tingkat energi yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya, dikatakan atom tersebut dalam keadaan
- eksitasi
 - transisi
 - ionisasi
 - dasar
 - stasioner
22. Panjang gelombang sinar yang dipancarkan jika terjadi transisi elektron dari tingkat energi E_2 ke tingkat energi E_1 memenuhi persamaan ... (h = konstanta Planck dan c = kecepatan cahaya).
- $\frac{hc}{E_2 - E_1}$
 - $hc(E_2 - E_1)$
 - $\frac{E_2 - E_1}{hc}$
 - $\frac{c(E_2 - E_1)}{h}$
 - $\frac{h(E_2 - E_1)}{c}$
23. Diagram di bawah ini menunjukkan empat tingkatan energi suatu atom logam.
-
- Dari pengolahan data tersebut, dengan mengandaikan transisi ke tingkatan energi yang lebih rendah selalu mungkin, dapat ditarik kesimpulan bahwa
- ada 6 garis spektrum yang mungkin terjadi akibat transisi elektron;
 - panjang gelombang minimum spektrum emisinya $1 \times 10^{-7} \text{ m}$;

- 3) panjang gelombang minimum spektrum emisinya $5 \times 10^{-7} \text{ m}$;
- 4) ada komponen spektrum emisi yang merupakan sinar tampak.

Pernyataan yang sesuai dengan model atom Bohr adalah

- a. 1, 2, dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4
24. Panjang gelombang de Broglie elektron pada orbit dengan bilangan kuantum 1 adalah ... (Jari-jari Bohr $0,53 \text{ \AA}$).
- a. $1,1 \text{ \AA}$
 - b. $1,7 \text{ \AA}$
 - c. $2,5 \text{ \AA}$
 - d. $3,4 \text{ \AA}$
 - e. $5,1 \text{ \AA}$

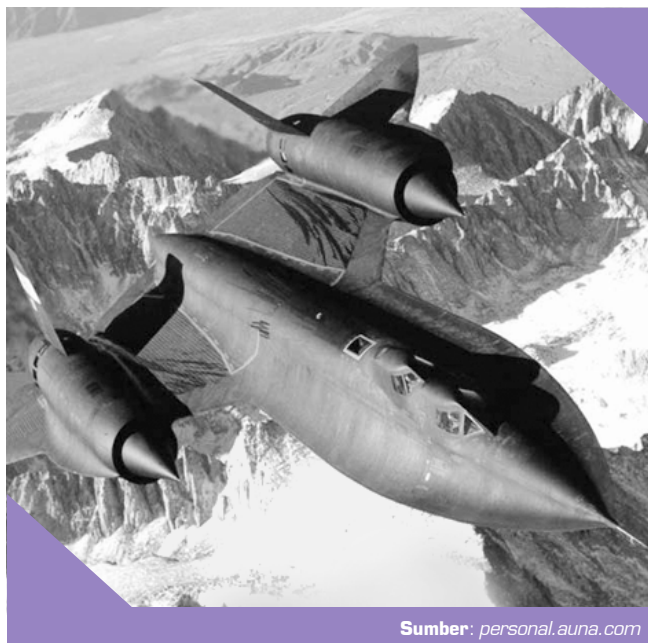
25. Dalam model atom Bohr, elektron atom hidrogen yang mengorbit di sekitar inti atom membangkitkan arus listrik rata-rata $0,8 \text{ mA}$ pada suatu titik di orbit lintasannya. Jika besar muatan elektron $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, jumlah putaran per sekon elektron tersebut mengelilingi inti adalah

- a. 5×10^9
- b. 5×10^{12}
- c. 5×10^{15}
- d. 5×10^{16}
- e. 5×10^{18}

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Tuliskanlah beberapa kesimpulan Dalton mengenai atom dengan kata-kata Anda sendiri.
2. Tentukan panjang gelombang foton yang diperlukan untuk mengionisasi atom hidrogen dari keadaan dasarnya.
3. Jelaskan secara singkat eksperimen yang dilakukan Thomson untuk menentukan besar muatan elektron.
4. Berapakah energi yang diperlukan untuk mengionisasi atom hidrogen pada keadaan $n = 2$?
5. Jelaskan secara singkat eksperimen Millikan untuk menentukan besar muatan elektron.
6. Elektron atom hidrogen bertransisi dari $n = 4$ ke $n = 2$.
 - a. Tentukan energi yang dipancarkan atom.
 - b. Berapakah panjang gelombangnya?
7. Jelaskan secara singkat eksperimen yang dilakukan Rutherford untuk menguji kebenaran model atom Thomson.
8. Sebuah elektron dengan massa m bergerak dengan kelajuan u menumbuk sebuah atom sehingga kelajuannya berkurang menjadi v . Tumbukan tersebut mengakibatkan atom tersebut tereksitasi dari keadaan dasarnya dan tidak lama kemudian atom kembali ke keadaan dasarnya. Buktikan bahwa panjang gelombang foton yang dipancarkan atom itu memenuhi persamaan

$$\lambda = \frac{2hc}{m(u^2 - v^2)}$$
 dengan h = konstanta Planck dan c = kelajuan cahaya.
9. Jelaskan perbedaan antara model atom Thomson Rutherford.
10. Energi total untuk melepaskan semua elektron atom helium adalah 79 eV . Tentukan energi yang diperlukan untuk melepaskan sebuah elektron dari atom helium pada keadaan dasarnya.



Sumber: personal.auna.com

8

B a b 8

Teori Relativitas Khusus

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma Fisika Modern dengan cara memformulasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang, dan massa, serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

Sampai saat ini, belum ditemukan benda yang mampu bergerak dengan kecepatan cahaya. Secara teoritis, pengamatan terhadap suatu benda yang bergerak akan menjadi relatif jika kecepatan benda tersebut sangat tinggi, yakni mendekati kecepatan cahaya.

Pesawat SR-71 merupakan salah satu pesawat yang mampu terbang dengan kecepatan tinggi, yakni tiga kali lebih cepat dari kecepatan suara. Jika Anda melihat pesawat SR-71 terbang dengan kecepatan tersebut, apakah Anda akan melihat perubahan benda pada pesawat SR-71 tersebut?

Albert Einstein dengan teori relativitasnya mengemukakan bahwa besaran-besaran fisika, seperti kecepatan, panjang, waktu, dan massa memiliki sifat relatif. Ungkapannya yang terkenal mengenai kesetaraan massa dan energi telah mengantarkan manusia pada gagasan pembuatan bom atom.

Pada bab ini, Anda akan mempelajari tentang teori relativitas, mulai dari teori relativitas Newton hingga teori relativitas khusus yang dinyatakan oleh Einstein.

- A. Teori Relativitas Newton**
- B. Eksperimen Michelson-Morley**
- C. Postulat Einstein untuk Teori Relativitas Khusus**
- D. Kesetaraan Massa dan Energi**

Soal Pramateri

1. Tuliskanlah Hukum Pertama, Kedua, dan Ketiga Newton tentang gerak.
2. Apakah yang Anda ketahui tentang kerangka acuan? Jelaskan.
3. Apakah yang Anda ketahui tentang relativitas? Jelaskan.

Gambar 8.1

Kecepatan relatif.

Jelajah Fisika

**Isaac Newton
(1642–1727)**

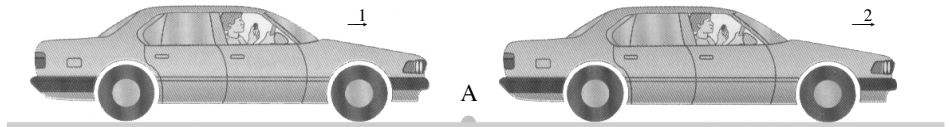


Isaac Newton menyadari bahwa gerak bersifat relatif, namun ia berpendapat bahwa terdapat suatu "ruang mutlak" sebagai dasar untuk mengukur semua posisi dan gerak dengan sebaik-baiknya. Pada 1665 dan 1666, Newton membuat beberapa terobosan Matematika termasuk gagasan binomial dan kalkulus. Ia menjadi profesor Matematika di Universitas Cambridge, Inggris, ketika baru berusia 26 tahun.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

A Teori Relativitas Newton

Teori relativitas berkaitan dengan peristiwa yang diamati dan diukur dari kerangka acuan inersial, yakni kerangka acuan di mana Hukum Pertama Newton berlaku. Hukum Pertama Newton tentang gerak menyatakan bahwa sebuah benda akan diam atau bergerak dengan kecepatan tetap jika resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut sama dengan nol. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa kerangka acuan inersial adalah kerangka acuan diam atau bergerak dengan kecepatan tetap relatif terhadap suatu kerangka acuan lainnya.



Untuk memahami teori relativitas Newton, perhatikan **Gambar 8.1**. Dua buah mobil sedang bergerak searah pada garis lurus yang sama masing-masing dengan kecepatan v_1 dan v_2 relatif terhadap titik A di tanah (kerangka acuan diam). Berapakah kecepatan mobil kedua relatif terhadap mobil pertama (v_{21})? Pertanyaan ini mengandung makna bahwa mobil pertama dijadikan kerangka acuan juga, tetapi bergerak. Misalnya, pada $t = 0$ kedua mobil berada di A. Kemudian, pada saat t jarak yang ditempuh kedua mobil masing-masing $s_1 = v_1 t$ dan $s_2 = v_2 t$. Jarak mobil kedua terhadap mobil pertama adalah $s_{21} = s_2 - s_1 = (v_2 - v_1)t$. Dengan demikian, kecepatan mobil kedua relatif terhadap mobil pertama adalah

$$v_{21} = \frac{s_{21}}{t} = \frac{(v_2 - v_1)t}{t} = v_2 - v_1 \quad (8-1)$$

Dari **Persamaan (8-1)**, jika kecepatan mobil kedua (v_2) berubah terhadap waktu, sedangkan kecepatan mobil pertama (v_1) tetap, percepatan mobil kedua terhadap mobil pertama adalah

$$a_{21} = \frac{dv_{21}}{dt} = \frac{dv_2}{dt} - \frac{dv_1}{dt} = a - 0 = a_2 \quad (8-2)$$

Persamaan (8-2) menunjukkan bahwa percepatan mobil kedua relatif terhadap mobil pertama sama dengan percepatan mobil kedua terhadap titik A. Oleh karena titik A merupakan kerangka acuan diam dan mobil pertama merupakan kerangka acuan bergerak dengan kecepatan tetap, dapat dikatakan bahwa percepatan benda pada kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap sama dengan percepatan benda pada kerangka acuan diam.

Selanjutnya, dari **Persamaan (8-2)** diperoleh $ma_{21} = ma_2$ atau $F_{21} = F_2$. Hal ini menunjukkan bahwa gaya yang bekerja pada benda dalam kerangka acuan bergerak dengan kecepatan tetap (F_{21}) sama dengan gaya yang bekerja pada benda dalam kerangka acuan diam (F_2). Dengan kata lain, hukum-hukum Newton berlaku sama pada kerangka acuan inersial. Dengan cara yang sama, persamaan-persamaan Fisika lainnya dapat dibuktikan memenuhi prinsip relativitas. Keadaan seperti ini disebut *relativitas Newton*.

Samanya hukum-hukum mekanika pada semua kerangka inersial menunjukkan bahwa tidak ada satu pun kerangka inersial yang khusus. Dapat disimpulkan bahwa semua kerangka inersial adalah sama untuk semua fenomena mekanik. Tidak ada satu pun kerangka inersial yang lebih baik dari kerangka inersial lainnya. Ketika Anda katakan *sebuah mobil bergerak*



Teori Elektromagnetik Maxwell mengemukakan bahwa kecepatan cahaya selalu sama atau konstan. Misalnya, apabila sebuah mobil melaju dengan kecepatan 90 km/jam, kecepatan cahaya yang memancar dari kedua lampunya adalah c , bukan c ditambah 90 km/jam. Uji coba seperti percobaan Michelson-Morley membuktikan bahwa Maxwell benar.

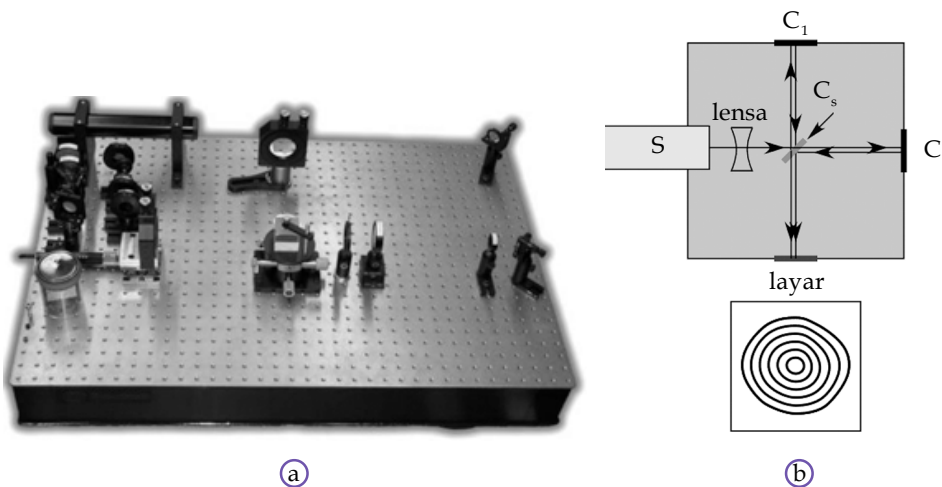
Sumber: Jendela Iptek, 1997

relatif terhadap pohon di pinggir jalan, tidak ada bedanya apabila Anda katakan pohon di pinggir jalan bergerak relatif terhadap mobil. Mana yang bergerak dan mana yang diam menjadi relatif. Tidak ada kerangka acuan yang diam mutlak, semuanya relatif.

Akan tetapi, permasalahan muncul ketika ditemukan bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Maxwell memprediksi dengan tepat kelajuan cahaya di ruang hampa sama dengan kelajuan cahaya yang terukur oleh Hertz delapan tahun setelah kematian Maxwell, yakni $c = 3 \times 10^8$ m/s. Pertanyaannya adalah, terhadap kerangka acuan apakah kecepatan cahaya ini diukur? Penerapan teori relativitas Newton akan memberikan kesimpulan bahwa kelajuan cahaya berbeda pada kerangka acuan yang satu dan kerangka acuan lainnya. Sebagai contoh, kelajuan cahaya relatif terhadap pengamat yang bergerak dengan kelajuan $0,5c$ searah gerak cahaya adalah $c - 0,5c = 0,5c$. Tetapi, persamaan Maxwell tidak dapat dibuktikan memenuhi teori relativitas. Kelajuan cahaya haruslah tetap c . Hal ini mengindikasikan bahwa ada kerangka acuan yang khusus berlaku untuk cahaya.

B Eksperimen Michelson-Morley

Beberapa ilmuwan ada yang menduga bahwa kelajuan cahaya sebesar c diukur terhadap suatu medium yang disebut eter. Medium eter tersebut mengisi seluruh alam raya sebagai medium perambatan cahaya. **A. A. Michelson** dan **E. W. Morley** adalah orang yang mencoba membuktikan keberadaan eter pada 1887. Michelson dan Morley merancang eksperimen untuk mengukur kelajuan eter relatif terhadap Bumi. Melalui eksperimen tersebut, Michelson dan Morley berharap dapat menemukan kerangka acuan mutlak yang benar-benar dalam keadaan diam.



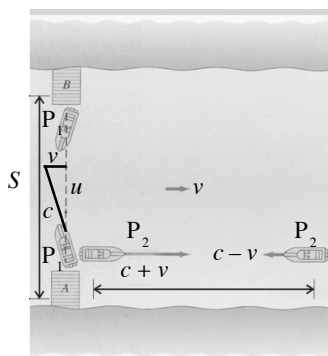
Sumber: www.monas.keidenuniv.nl

Sumber: www.wfu.edu

Gambar 8.2

(a) Interferometer Michelson dan (b) skema sederhananya.

Gambar 8.2 memperlihatkan susunan peralatan eksperimen Michelson-Morley yang disebut interferometer Michelson. Cahaya dari sebuah sumber dijatuhkan pada cermin C_s (**Gambar 8.2 (c)**). Sebagian berkas cahaya dipantulkan oleh C_s dan mengenai cermin C_1 . Sebagian berkas lainnya diteruskan oleh C_s dan mengenai cermin C_2 . Berkas cahaya yang dipantulkan oleh cermin C_1 dan C_2 bertemu kembali pada cermin C_s . Kedua cahaya pantul ini akan berinterferensi sehingga menghasilkan pola interferensi.



Sumber: *Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics*, 2000

Gambar 8.3

Eksperimen Michelson-Morley dapat dianalogikan dengan perahu P_1 pulang-pergi menyeberang tegak lurus arus air dan perahu P_2 pulang-pergi sejajar arus.

Pola interferensi (maksimum atau minimum) bergantung pada beda fase kedua cahaya yang berinterferensi. Untuk panjang lintasan yang sama, beda fase gelombang bergantung pada selisih waktu (Δt) dari dua gelombang yang bertemu. Eksperimen Michelson-Morley diatur dengan membuat jarak dari C_s ke C_1 sama dengan jarak dari C_s ke C_2 . Kemudian, dari sini diturunkan persamaan yang menyatakan hubungan antara waktu yang diperlukan cahaya untuk pulang-pergi dengan kelajuan eter. Kelajuan eter dapat ditentukan dengan mengamati pola interferensi yang dihasilkan.

Persamaan untuk menentukan kelajuan eter dapat diturunkan dengan membuat analogi gerak perahu menyeberangi sungai, seperti diperlihatkan pada **Gambar 8.3**. Misalnya, perahu P_1 dan P_2 bergerak dengan kecepatan c terhadap tepi sungai dan arus air memiliki kecepatan v terhadap tepi sungai.

Pertama, Anda tinjau perahu P_1 . Agar lintasan perahu selalu tegak lurus arus air, arah gerak perahu saat pulang dan pergi masing-masing seperti diperlihatkan pada **Gambar 8.3**. Besar kecepatan resultannya sama, yakni $u = \sqrt{c^2 - v^2}$. Dengan demikian, waktu yang diperlukan perahu P_1 untuk pulang-pergi adalah

$$t_1 = \frac{2s}{u} = \frac{2s}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (8-3)$$

Selanjutnya, tinjau perahu P_2 . Ketika berangkat, kecepatan perahu menjadi $u_1 = c + v$ dan ketika pulang, kecepatannya menjadi $u_2 = c - v$. Dengan demikian, waktu yang diperlukan perahu P_2 untuk pulang-pergi adalah

$$t_2 = \frac{s}{u_1} + \frac{s}{u_2} = \frac{s}{c + v} + \frac{s}{c - v} = \frac{s(c - v) + s(c + v)}{(c + v)(c - v)} = \frac{2sc}{c^2 - v^2}$$

atau

$$t_2 = \frac{2 \frac{s}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (8-4)$$

Dari **Persamaan (8-3)** dan **(8-4)**, selisih waktu antara perahu P_1 dan P_2 untuk tiba kembali ke tempat asal adalah

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2s}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \quad (8-5)$$

Kata Kunci

- Elektromagnet
- Eter
- Kecepatan cahaya
- Kerangka acuan inersial
- Teori relativitas

Dalam kaitannya dengan eksperimen Michelson-Morley, perahu P_1 analog dengan cahaya yang mengenai cermin C_1 , perahu P_2 analog dengan cahaya yang mengenai cermin C_2 , dan arus air adalah eter.

Interferensi maksimum di pusat akan terjadi ketika selisih fase kedua cahaya sama dengan nol, atau $\Delta t = 0$. Dari **Persamaan (8-5)**, $t = 0$ maka

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 0$$

atau

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1$$

dan ini dipenuhi jika $v = 0$. Eksperimen Michelson-Morley yang dilakukan berulang-ulang dengan berbagai kondisi, ternyata mendapatkan hasil yang sama, yakni tidak ada pola interferensi. Hasil yang teramati adalah cahaya terang. Keadaan ini menunjukkan bahwa $v = 0$. Di lain pihak, jika eter itu ada dan diam, eter akan memiliki kelajuan yang sama dengan kelajuan rotasi Bumi, tapi berlawanan arah. Dengan kata lain, $v \neq 0$. Hasil eksperimen Michelson-Morley mengantarkan pada beberapa simpulan sebagai berikut.

1. Dugaan atau hipotesis tentang keberadaan eter sebagai medium perambatan cahaya adalah tidak benar (eter tidak ada).
2. Kelajuan cahaya adalah besaran mutlak, tidak bergantung pada kerangka acuan inersial.

Hasil eksperimen Michelson-Morley ini menjadi teka-teki besar sampai akhirnya **Albert Einstein** (1879–1955) mengajukan teori relativitas khusus pada 1905.

C Postulat Einstein untuk Teori Relativitas Khusus

Teori relativitas khusus yang diajukan Einstein tidak dipengaruhi secara langsung oleh hasil eksperimen Michelson-Morley. Einstein hanya berusaha untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan yang berkaitan dengan teori elektromagnetik dan gelombang cahaya. Dari hasil kajiannya, Einstein melihat adanya inkonsistensi pada teori elektromagnetik yang menganggap keberadaan ruang mutlak. Berdasarkan hasil kajiannya, Einstein mengajukan dua postulat sebagai berikut.

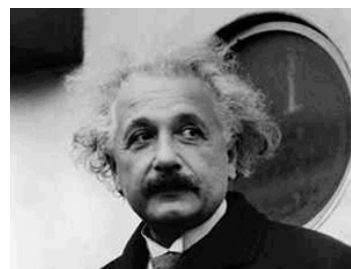
1. Hukum-hukum Fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka inersial.
2. Cahaya yang merambat di ruang hampa dengan kecepatan tetap c tidak bergantung pada kecepatan sumber atau pengamat.

Pernyataan pada postulat pertama didasarkan pada kenyataan bahwa tidak ada kerangka acuan umum yang diam mutlak. Postulat tersebut juga merupakan perluasan dari realtivitas Newton sehingga tidak hanya berlaku untuk hukum-hukum mekanik, tetapi berlaku juga untuk Fisika lainnya, termasuk kelistrikan dan kemagnetan.

Sementara itu, postulat kedua hampir sulit untuk diterima karena bertentangan dengan kebiasaan yang terlihat sehari-hari. Pertentangan rasa ini terjadi karena yang terlihat sehari-hari adalah gerak benda dengan kecepatan-kecepatan rendah, jauh lebih rendah dari kecepatan cahaya. Implikasi dari postulat kedua ini sangat luas, membuat besaran-besaran Fisika seperti kecepatan dan panjang bersifat relatif, bahkan termasuk massa dan waktu.

Jelajah Fisika

Albert Einstein
(1879–1955)



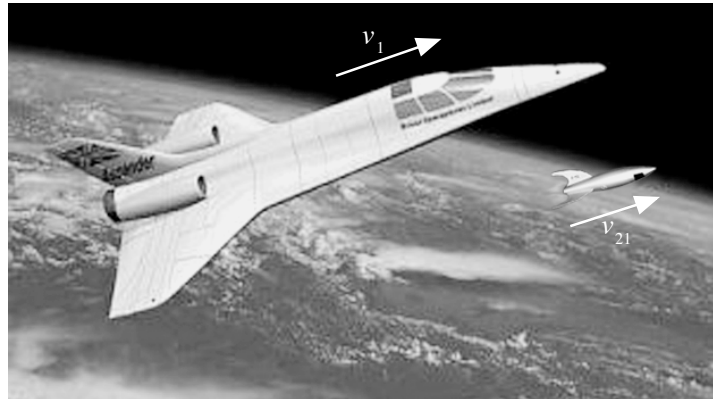
Albert Einstein terkenal berkat teori relativitasnya. Einstein menerbitkan sebuah tulisan tentang teori istimewanya pada 1905 dan mengembangkan teori umum tersebut sampai 1915.

Sumber: Jendela Iptek, 1997



1. Relativitas Kecepatan Menurut Enstein

Tinjaulah sebuah pesawat angkasa yang bergerak dengan kelajuan v_1 terhadap Bumi (kerangka acuan diam), seperti diperlihatkan pada **Gambar 8.4**.



Sumber: www.best-of-langkawi.com

Gambar 8.4

Menentukan kecepatan roket relatif terhadap Bumi.

Jelajah Fisika

Pemercepat Partikel sebagai Bukti



Partikel-partikel seperti elektron dapat dibuat supaya melaju sangat cepat dalam sebuah akselerator, seperti akselerator bundar di Fermilab, Illinois, AS. Partikel dipacu dengan memanfaatkan medan magnet. Semakin besar energi yang diberikan medan magnet, semakin cepat partikel melaju. Kecepatan tambahan yang berhasil diperoleh partikel tidak pernah cukup untuk melaju lebih cepat daripada kecepatan cahaya karena setiap energi tambahan membuat partikel bertambah berat. Keadaan tersebut telah diperkirakan oleh Einstein.

Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

Dari pesawat ditembakkan peluru kendali dengan kecepatan v_{21} relatif terhadap pesawat (kerangka acuan bergerak). Seseorang yang diam di Bumi mengukur kecepatan peluru kendali relatif terhadap tanah sebesar v_2 . Menurut Einstein, kecepatan yang terukur oleh orang tadi memenuhi persamaan berikut.

$$v_2 = \frac{v_1 + v_{21}}{1 + \frac{v_1 v_{21}}{c^2}} \quad (8-6)$$

Jika arah v_{21} berlawanan dengan v_1 , tanda positif (+) pada **Persamaan (8.6)** diganti oleh tanda negatif (-). Dari **Persamaan (8-6)** dapat diperoleh

$$v_{21} = \frac{v_2 - v_1}{1 - \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (8-7)$$

Koreksi relativitas kecepatan Einstein terhadap relativitas kecepatan Newton adalah penambahan faktor $\frac{v_1 v_2}{c^2}$ pada penyebut. Untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan jauh lebih kecil daripada kecepatan cahaya, yakni $v_1 \ll c$ dan $v_2 \ll c$, faktor $\frac{v_1 v_2}{c^2} \approx 0$ sehingga **Persamaan (8-7)** menjadi $v_{21} = v_2 - v_1$, sama dengan relativitas kecepatan Newton seperti pada **Persamaan (8-1)**. Dengan demikian, teori relativitas kecepatan yang diajukan Einstein berlaku umum, sedangkan teori relativitas Newton hanya berlaku untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan jauh lebih kecil daripada kecepatan cahaya.

Contoh 8.1

Sebuah pesawat antariksa bergerak dengan kelajuan $0,8c$ menjauhi pengamat di Bumi. Dari pesawat ditembakkan peluru dengan kelajuan $0,4c$ searah gerak pesawat.

- Tentukan kelajuan peluru terhadap pengamat menggunakan teori relativitas Newton.
- Tentukan kelajuan peluru terhadap pengamat menggunakan teori relativitas Einstein.

- c. Berapa persen kesalahan relativitas Newton relatif terhadap relativitas Einstein? (c = kelajuan cahaya)

Jawab

Diketahui: $v_1 = 0,8c$ dan $v_{21} = 0,4c$.

- a. Menurut teori relativitas Newton,

$$v_2 = v_1 + v_{21} = 0,8c + 0,4c = 1,2c$$

- b. Menurut teori relativitas Einstein,

$$v_2 = \frac{v_1 + v_{21}}{1 + \frac{v_1 v_{21}}{c^2}} = \frac{0,8c + 0,4c}{1 + \frac{(0,8c)(0,4c)}{c^2}} = \frac{1,2c}{1,24} = 0,98c$$

- c. Selisih v_2 menurut relativitas Newton dan Einstein adalah

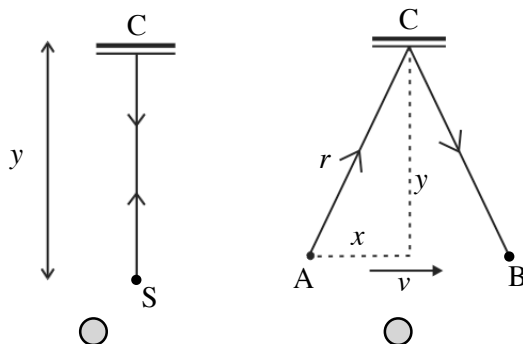
$$\Delta v_2 = 1,2c - 0,98c = 0,22c.$$

Dengan demikian, persentase kesalahan relativitas Newton terhadap relativitas Einstein adalah,

$$\frac{\Delta v_2}{v_{2(\text{Einstein})}} = \frac{0,22c}{0,98c} \times 100\% = 22,45\%.$$

2. Pemuluran Waktu

Menurut Einstein, selang waktu yang terukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian dan yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kelajuan konstan terhadap kejadian tidaklah sama. Hal ini terjadi karena waktu bukanlah suatu besaran yang mutlak. Untuk memahami hal tersebut, tinjaulah **Gambar 8.5**.



Gambar 8.5

Lintasan cahaya menurut pengamat yang (a) diam dan (b) bergerak dengan kelajuan tetap terhadap kejadian untuk membuktikan adanya pemuluran waktu.

Seberkas cahaya dipancarkan dari sebuah sumber S menuju sebuah cermin C yang terpisah pada jarak y . Pengamat yang diam terhadap peristiwa akan mendapati cahaya datang dan cahaya pantul melalui lintasan yang sama, seperti diperlihatkan pada **Gambar 8.5(a)**. Selang waktu yang diperlukan oleh cahaya untuk menempuh lintasan bolak-balik adalah

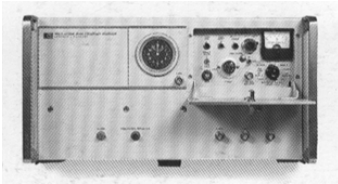
$$\Delta t_0 = \frac{2y}{c}$$

Di lain pihak, menurut pengamat yang bergerak dengan kelajuan v terhadap peristiwa akan mendapati lintasan cahaya menjadi seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 8.5(b)**. Dalam selang waktu Δt , sumber cahaya telah menempuh jarak AB, yakni $2x = v \Delta t$. Selanjutnya, dengan menggunakan dalil Pythagoras diperoleh

$$r = \sqrt{y^2 + x^2} \text{ atau } r = \sqrt{y^2 + \left(\frac{v \Delta t}{2}\right)^2}$$

Jelajah Fisika

Jam Terbang



Sebuah jam atom pernah diterbangkan keliling dunia menggunakan pesawat Concorde yang lebih cepat dari kecepatan suara, meskipun hanya sekitar 0,0002 persen dari kecepatan cahaya. Waktu pada jam tersebut dibandingkan dengan jam atom serupa yang berada di Bumi. Meskipun pengaruh pemuluran waktu dihitung dalam per milyaran detik, pada kecepatan ini jam atom itu cukup peka untuk memperlihatkan memulurnya waktu seperti diramalkan dalam teori Einstein.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Selang waktu yang diperoleh cahaya untuk menempuh lintasan ACB adalah

$$\Delta t = \frac{2r}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{y^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2} \right)^2}$$

$$(\Delta t)^2 = \frac{4}{c^2} \left(y^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2} \right)^2 \right) = \frac{4y^2}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} (\Delta t)^2$$

atau

$$(\Delta t)^2 - \frac{v^2}{c^2} (\Delta t)^2 = \frac{4y^2}{c^2}$$

$$(\Delta t)^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{4y^2}{c^2}$$

Akarkan kedua ruas dan masukkan persamaan $\Delta t_0 = \frac{2y}{c}$ maka akan diperoleh

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8-8)$$

dengan Δt = selang waktu yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kelajuan v terhadap kejadian, dan

Δt_0 = selang waktu yang terukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian.

Persamaan (8-8) menunjukkan bahwa $\Delta t > \Delta t_0$ karena $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$.

Dengan kata lain, waktu yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kelajuan v terhadap kejadian lebih lama (mulur) dari waktu yang terukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian. **Persamaan (8-8)** dikenal sebagai pemuluran waktu (*time dilation*). Waktu yang terukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian (Δt_0) disebut waktu benar atau waktu proper (*proper time*).

Contoh 8.2

Seorang pengamat mengukur periode ayunan bandul di laboratorium dan hasilnya adalah 2 sekon. Berapa periode bandul yang terukur oleh pengamat lain yang berada didalam pesawat angkasa jika pesawat tersebut bergerak dengan kelajuan $0,6c$ terhadap laboratorium?

Jawab

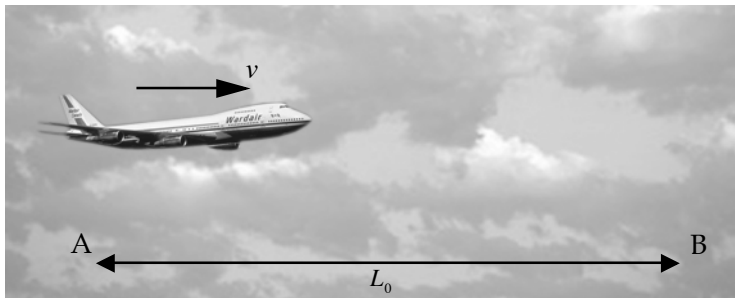
Diketahui: $\Delta t_0 = 2$ sekon.

Periode bandul yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kelajuan $0,6c$ terhadap laboratorium adalah

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2s}{\sqrt{1 - \frac{0,6^2}{1}}} = \frac{2s}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{2s}{\sqrt{0,64}} = \frac{2s}{0,8} = 2,5 \text{ sekon}$$

3. Penyusutan Panjang

Selain selang waktu, panjang sebuah benda juga bersifat relatif, bergantung pada kerangka acuan. Untuk itu, tinjaulah sebuah pesawat yang bergerak dengan kelajuan v dari A menuju B, seperti diperlihatkan pada Gambar 8.6.



Gambar 8.6

Penyusutan panjang atau jarak.

Jarak A dan B adalah tetap (L_0). Seorang pengamat yang diam relatif terhadap kedua titik akan mengukur panjang AB sebenarnya, yakni L_0 . Di lain pihak, jarak AB menurut pilot (L), adalah

$$L = v\Delta t_0$$

dengan Δt_0 adalah selang waktu yang diperlukan pesawat untuk menempuh jarak AB menurut pilot. Mengapa Δt_0 menurut pilot? Karena pilot diam relatif terhadap pesawat sehingga selang waktu yang ia ukur adalah selang waktu benar (Δt_0). Sementara itu, meskipun diam terhadap titik A dan B, pengamat bergerak relatif terhadap pilot sehingga selang waktu yang terukur oleh pengamat tersebut adalah Δt . Jadi, menurut pengamat, jarak AB adalah $L_0 = v\Delta t$. Selanjutnya, hubungan antara L dan L_0 dapat ditentukan dengan membandingkan keduanya sebagai berikut.

$$\frac{L}{L_0} = \frac{v\Delta t_0}{v\Delta t} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t}$$

Dari **Persamaan (8.8)** diperoleh

$$\frac{\Delta t_0}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Dengan demikian

$$\frac{L}{L_0} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

atau

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (8-9)$$

Persamaan (8-9) menunjukkan bahwa panjang yang terukur oleh pengamat yang bergerak terhadap objek yang diukur menjadi lebih pendek dari panjang sebenarnya. Dengan kata lain, benda yang bergerak akan mengalami penyusutan panjang ketika ada gerak relatif antara benda dan pengamat. **Persamaan (8-9)** dikenal sebagai penyusutan panjang (*length contraction*). Panjang L_0 disebut panjang benar atau panjang proper.

Kata Kunci

- Energi relativistik
- Massa relativistik
- Momentum relativistik
- Pemuluran waktu
- Penyusutan panjang
- Relativitas Einstein
- Relativitas kecepatan



Solusi

Cerdas

Seorang astronaut sedang menuju sebuah planet dengan menggunakan pesawat ulang alik dengan kecepatan 0,8 kali kecepatan cahaya. Dengan menggunakan transformasi Lorentz, persentase pertambahan massa astronaut tersebut adalah

- 25 %
- 28 %
- 33 %
- 50 %
- 66 %

Penyelesaian

Diketahui: $v = 0,8c$

$$m_0 < m$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{0,36}} = \frac{m_0}{0,6} = \frac{10}{6} m_0$$

Pertambahan massa = $1,66 m_0$

Jadi,

% pertambahan

$$= \frac{(1,66 - 1)}{1} \times 100\% = 66 \%$$

Jawab : e

UN SMA 2004/2005

Penyusutan panjang hanya terjadi jika arah gerak benda relatif terhadap pengamat sejajar dengan panjang benda. Panjang benda yang arah geraknya tegak lurus panjangnya tidak mengalami perubahan.

Contoh 8.3

Sebuah lapangan sepak bola berukuran panjang 110 m dan lebar 110 m. Sebuah pesawat angkasa bergerak sejajar panjang lapangan dengan kecepatan $0,80c$. Tentukan luas lapangan yang terukur oleh pilot pesawat.

Jawab

Karena pesawat bergerak sejajar panjangnya, berarti pesawat bergerak tegak lurus lebarnya. Dengan demikian, hanya panjang lapangan yang berubah, sedangkan lebarnya tidak. Diketahui panjang lapangan adalah $L_{01} = 110$ m dan lebarnya $L_{02} = 90$ m. Panjang lapangan yang terukur oleh pilot yang bergerak dengan kelajuan $v = 0,8c$ adalah

$$L = L_{01} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = (110 \text{ m}) \sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}} = (110 \text{ m})(0,6) = 66 \text{ m}.$$

Dengan demikian, luas lapangan yang terukur oleh pilot adalah

$$A = L_{02} L = (90 \text{ m})(66) = 5.940 \text{ m}^2.$$

4. Massa dan Momentum Relativistik

Sebelum teori relativitas diajukan, massa benda merupakan besaran yang dianggap tetap. Akan tetapi, menurut teori relativitas Einstein, massa benda yang bergerak dengan kecepatan v akan berubah menurut persamaan berikut.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8-10)$$

Dengan demikian, momentum benda yang bergerak memenuhi

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8-11)$$

dengan: p = momentum relativistik (Ns),
 m = massa relativistik (kg), dan
 m_0 = massa diam (kg).

Persamaan (8-10) menunjukkan bahwa massa benda yang bergerak menjadi lebih besar daripada massa diamnya.

Contoh 8.4

Benda dengan massa diam 1,5 kg bergerak dengan kelajuan $0,8c$. Tentukanlah:

- massa benda, dan
- momentum relativistiknya.

Jawab

Diketahui: $m_0 = 1,5$ kg dan $v = 0,8c$.

- a. Massa relativistiknya adalah

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1,5 \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = 2,5 \text{ kg}$$

- b. Momentum relativistiknya adalah

$$p = mv = (2,5 \text{ kg})(0,8 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 6 \times 10^8 \text{ Ns}$$

Soal Penguasaan Materi 8.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Dua pesawat (A dan B) bergerak dengan kecepatan masing-masing $0,6c$ dan $0,5c$ terhadap pengamat yang diam di Bumi. Tentukan kecepatan pesawat A menurut B jika:
 - A dan B bergerak searah, dan
 - A dan B bergerak berlawanan arah.
- Ada dua anak kembar bernama Jaka dan Joko. Jaka pergi menelusuri jagat raya menggunakan pesawat antariksa dengan kelajuan $0,8c$ terhadap Bumi, sedangkan Joko tetap di Bumi. Joko mencatat bahwa Jaka telah melanglang buana selama 20 tahun hingga mereka bertemu kembali.
 - Berapa lama mereka tidak bertemu menurut Jaka?
 - Berapa selisih umur mereka sekarang?
- Umur pion (partikel elementer) pada keadaan diam adalah $2,6 \times 10^{-8} \text{ s}$. Ketika bergerak, umurnya adalah $5,2 \times 10^{-8} \text{ s}$. Berapakah kelajuan pion?
- Sebuah tongkat panjangnya 2 m. Berapakah panjang tongkat yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kecepatan $0,8c$ terhadap tongkat jika:
 - arahnya sejajar dengan panjang tongkat,
 - arahnya tegak lurus terhadap panjang tongkat?
- Jika tongkat dan pengamat berada dalam pesawat angkasa berkecepatan $0,6c$ terhadap Bumi, berapa panjang tongkat yang terukur oleh pengamat itu sekarang?
- Anda sedang berdiri di pinggir jalan saat sebuah mobil melintas dengan kecepatan $0,5c$. Anda mencatat bahwa selisih waktu antara bagian muka dan belakang mobil melewati Anda adalah $2 \times 10^{-8} \text{ sekon}$.
 - Berapakah panjang mobil menurut Anda?
 - Berapakah panjang mobil menurut pengendaranya?
- Massa diam elektron $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
 - Berapakah massa elektron ketika bergerak dengan kelajuan $0,6c$?
 - Berapakah momentumnya?
- Massa sebuah benda yang bergerak menjadi dua kali massa diamnya. Berapakah kecepatan gerak benda tersebut?

D Kesetaraan Massa dan Energi

Ungkapan yang sangat terkenal dari teori Einstein adalah adanya kesetaraan antara massa dan energi. Menurut Einstein, benda yang bergerak dengan kelajuan v akan memiliki energi kinetik

$$EK = mc^2 - m_0c^2 \quad (8-12)$$

dengan: EK = energi kinetik relativistik,
 $mc^2 = E$ = energi total, dan
 $m_0c^2 = E_0$ = energi diam.

Jika **Persamaan (8-10)** dimasukkan ke **Persamaan (8-12)**, energi kinetik dapat ditulis sebagai



$$EK = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (8-13)$$

Muncul pertanyaan, apakah persamaan energi kinetik yang selama ini dikenal, yakni $EK = \frac{1}{2}mv^2$ salah? Jawabannya adalah ya, salah, tetapi untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Untuk benda-benda yang kecepatannya jauh lebih rendah dari kecepatan cahaya ($v \ll c$), perumusan mekanika klasik $EK = \frac{1}{2}mv^2$ adalah benar karena persentase kesalahannya sangat kecil (lihat **Contoh 8.5**).

Pada kecepatan rendah ($v \ll c$), energi kinetik $EK = \frac{1}{2}mv^2$ dapat dideduksi dari **Persamaan (8-13)** sebagai berikut. Ekspansi binomial menyatakan bahwa untuk $x \ll 1$,

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx$$

dengan n bilangan bulat. Berdasarkan ekspansi binomial tersebut,

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 - \left(-\frac{1}{2}\right)\left(\frac{v^2}{c^2}\right) = 1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}$$

Dengan demikian, **Persamaan (8-13)** dapat ditulis

$$EK = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \approx m_0 c^2 \left(\left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} \right] - 1 \right) = \frac{1}{2}m_0 v^2$$

Untuk $v \ll c$, juga akan diperoleh $m \approx m_0$ sehingga $EK = \frac{1}{2}mv^2 \approx \frac{1}{2}m_0 v^2$.

Dengan demikian, teori relativitas khusus Einstein berlaku untuk semua kecepatan dan untuk kecepatan-kecepatan rendah dapat didekati dengan persamaan klasik, $EK = \frac{1}{2}mv^2$.

Contoh 8.5

Sebuah benda dengan massa diam 2 kg bergerak dengan kelajuan 6×10^6 m/s.

- Hitunglah energi kinetik relativistik benda.
- Hitunglah energi kinetik benda berdasarkan perumusan mekanika klasik.
- Berapakah persentase kesalahan hasil perhitungan klasik terhadap relativistik?

Jangan Lupa

Ekspansi binomial merupakan perluasan dari dua unsur. Ekspansi binomial tidak diajarkan di SMA, tetapi setidaknya Anda dapat membuktikan menggunakan kalkulator. Misalnya, $x = 0,01$ dan $n = 2$. Menurut ekspansi binomial:

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx$$

$$(1 + 0,01)^2 \approx 1 + (2)(0,01) \approx 1,02$$

Jika Anda menggunakan kalkulator:

$$(1 + 0,02)^2 = (1,02)^2 = 1,0201$$

Perbedaannya sangat kecil, yaitu:

$$1,0201 - 1,02 = 0,0001 = 0,01 \%$$

Jawab

Diketahui: $m_0 = 2 \text{ kg}$ dan $v = 6 \times 10^6 \text{ m/s} = 0,02c$, dengan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

a. Berdasarkan teori relativitas Einstein, energi kinetik relativistik benda adalah

$$EK = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = (2 \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,2c^2}{c^2}}} - 1 \right) = 3,601 \times 10^{13} \text{ J}.$$

b. Berdasarkan perumusan klasik,

$$EK = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} (2 \text{ kg}) (6 \times 10^6 \text{ m/s})^2 = 3,6 \times 10^{13} \text{ J}.$$

c. Persentase kesalahan perumusan mekanika klasik terhadap relativistik adalah

$$\frac{(3,601 \times 10^{13} \text{ J}) - (3,6 \times 10^{13} \text{ J})}{(3,601 \times 10^{13} \text{ J})} \times 100\% = 0,028 \text{ \%}.$$

Persentase kesalahan ini sangat kecil. Contoh ini menunjukkan bahwa perumusan mekanika klasik untuk energi kinetik adalah tepat untuk benda-benda yang

bergerak dengan kecepatan rendah sampai dengan kecepatan sekitar $\frac{1}{100}$ kali kecepatan cahaya.

Dalam kaitannya dengan momentum, energi total $E = mc^2$ dapat ditulis sebagai berikut.

$$E^2 = m^2 c^4 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (8-14)$$

Persamaan (8-14) diturunkan dengan anggapan tidak ada energi potensial. Dengan demikian, energi total dapat ditulis kaitannya dengan momentum atau dalam kaitannya dengan energi kinetik seperti pada **Persamaan (8-12)**.

Momentum foton yang diungkapkan oleh Compton (lihat efek Compton pada Bab 6) diturunkan dari **Persamaan (8-14)**. Oleh karena foton tidak bermassa ($m_0 = 0$), sedangkan energi total foton $E = hf$ sehingga diperoleh

$$hf = pc \quad \text{atau} \quad p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Soal Penguasaan Materi 8.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Sebuah proton dengan massa diam $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ bergerak dengan kelajuan sebesar $2,40 \times 10^8 \text{ m/s}$, tentukanlah:
 - energi total proton, dan
 - energi kinetik proton.
- Partikel elementer pi-meson memiliki energi kinetik setengah kali energi totalnya. Berapakah kelajuan pi-meson?
- Berapa kelajuan elektron yang dipercepat pada beda potensial 1,0 MV? Massa diam elektron $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Bukti Ledakan



Teori relativitas khusus mengemukakan bahwa massa dan energi saling terkait. Oleh karena kecepatan cahaya sangat besar, suatu massa yang kecil dapat diubah menjadi tenaga yang jumlahnya sangat besar. Pada 1939, Einstein mengirim surat kepada Presiden AS, Roosevelt, mengemukakan bahwa hubungan antara massa dan energi dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan tenaga listrik atau membuat bom atom agar dipakai sebagai pencegah dalam perang dunia kedua. Ia tidak berpikir bahwa gagasan itu benar-benar diterapkan. Bom atom pertama, yang terlihat pada gambar, diuji di pulau Karang Bikini pada 1946.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Rangkuman

1. **Relativitas Newton**, hanya berlaku untuk kecepatan-kecepatan rendah.
2. **Eksperimen Michelson-Morley** menghasilkan simpulan:
 - a. eter tidak ada, dan
 - b. kelajuan cahaya adalah besaran mutlak.
3. **Postulat relativitas Einstein**:
 - a. hukum-hukum Fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka inersial,
 - b. cahaya yang merambat di ruang hampa memiliki kecepatan tetap c yang tidak bergantung pada kecepatan sumbernya atau kecepatan pengamat.
4. Teori relativitas kecepatan Einstein berlaku umum, sedangkan teori relativitas Newton hanya berlaku untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan jauh lebih kecil daripada kecepatan cahaya. Persamaan **relativitas kecepatan** adalah

$$v_{21} = \frac{v_2 + v_1}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

5. Pada pemuluran waktu, waktu yang terukur oleh pengamat yang bergerak dengan kelajuan v terhadap kejadian lebih lama daripada waktu yang terukur oleh pengamat lain yang diam terhadap kejadian. Persamaan **pemuluran waktu** adalah

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

6. Benda yang bergerak akan mengalami penyusutan panjang ketika ada gerak relatif antara benda dan pengamat. Persamaan **penyusutan panjang** adalah

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

7. Menurut teori relativitas Einstein, massa benda yang bergerak dengan kecepatan v akan berubah. Persamaan **massa relativistik** adalah

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

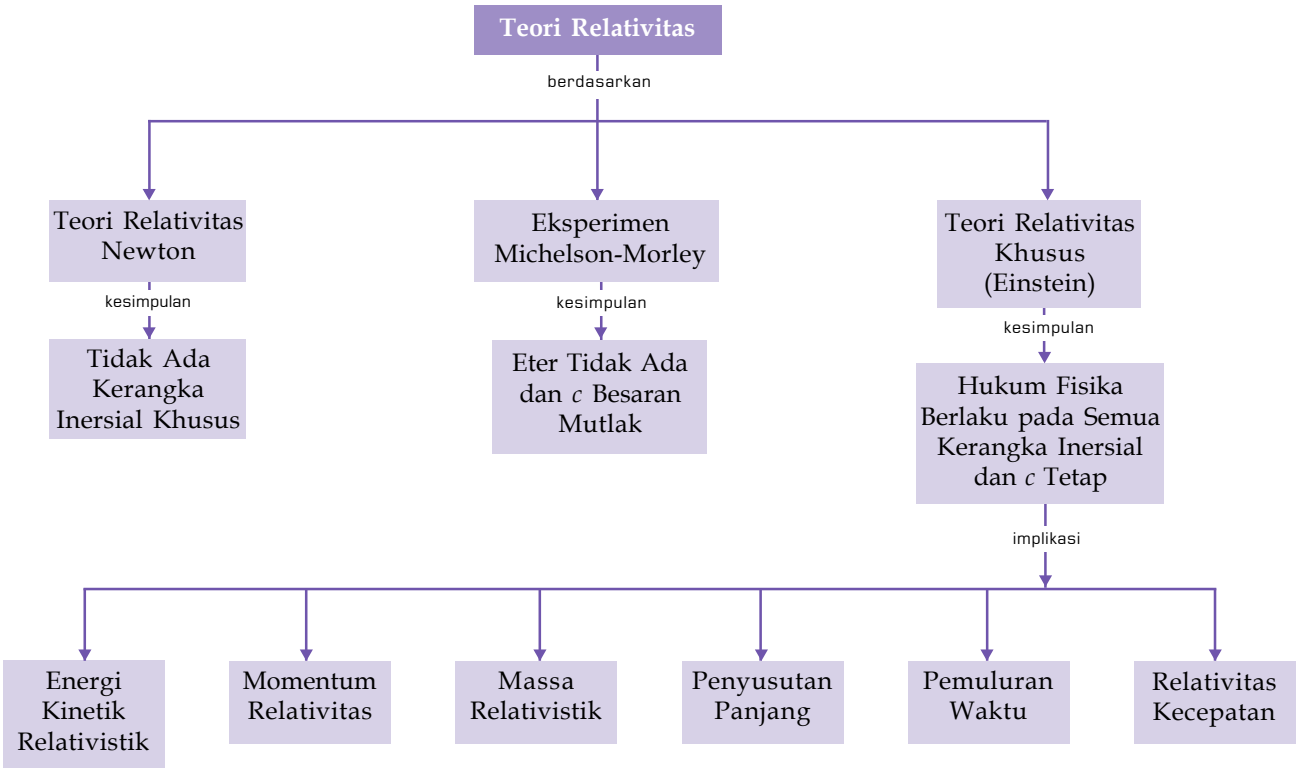
8. Oleh karena massa benda yang bergerak berubah maka momentum benda yang bergerak pun akan berubah. Persamaan **momentum relativistik** adalah

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

9. Persamaan **energi kinetik relativistik** adalah

$$EK = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Teori Relativitas Khusus, Anda dapat memformulasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang, dan massa serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi. Jika Anda belum mampu memformulasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang, dan massa, serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi, Anda belum menguasai materi bab Teori Relativitas Khusus dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 8

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Salah satu postulat Einstein adalah
 - panjang benda yang bergerak lebih kecil daripada panjang benda ketika diam
 - massa diam suatu benda lebih kecil daripada massanya saat bergerak
 - eter merupakan kerangka acuan mutlak
 - waktu yang terukur oleh pengamat bergerak lebih besar daripada waktu yang terukur oleh pengamat diam
 - kelajuan cahaya yang dipancarkan sumber diam sama dengan kelajuan cahaya yang dipancarkan sumber yang bergerak dengan kelajuan tetap
- Sebuah pesawat tempur bergerak dengan kecepatan $0,8c$ terhadap Bumi. Dari pesawat ditembakkan peluru kendali dengan kecepatan $0,5c$ searah dengan pesawat. Kecepatan peluru terhadap Bumi adalah
 - $0,23c$
 - $0,5c$
 - $0,77c$
 - $0,93c$
 - c
- Sebuah partikel yang bergerak dengan kelajuan $0,3c$ terhadap kerangka acuan laboratorium memancarkan sebuah elektron searah dengan kecepatan $0,3c$ relatif terhadap partikel. Laju elektron tersebut menurut kerangka acuan laboratorium adalah
 - $0,32c$
 - $0,55c$
 - $0,66c$
 - $0,76c$
 - $0,9c$
- Menurut pengamat di sebuah planet, ada dua pesawat antariksa yang mendekatnya dari dua arah yang berlawanan, masing-masing adalah pesawat A yang kecepatannya $0,5c$ dan pesawat B yang kecepatannya $0,4c$. Menurut pilot pesawat A, besar kecepatan pesawat B adalah
 - $0,1c$
 - $0,25c$
 - $0,4c$
 - $0,75c$
 - $0,9c$
- Seorang pengamat di laboratorium mengamati benda yang bergerak harmonik sederhana. Ia mencatat bahwa frekuensi geraknya adalah 20 Hz. Pengamat lain di dalam pesawat yang bergerak dengan kelajuan tetap relatif terhadap laboratorium mencatat bahwa frekuensi gerak benda adalah 12 Hz. Kelajuan pesawat adalah ...
 - $1,8 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - $2,4 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - $3,6 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - $4,8 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - $5,4 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Periode suatu pendulum di muka Bumi besarnya 3 s. Jika pendulum tersebut diamati oleh seseorang yang bergerak relatif terhadap Bumi dengan kecepatan $0,95c$, periode pendulum tersebut dalam detik adalah
 - 0,5 s
 - 1,5 s
 - 9,6 s
 - 15 s
 - 300 s
- Perbandingan dilatasi waktu antara sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,8c$ dan sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,6c$ adalah
 - 3 : 4
 - 4 : 3
 - 9 : 2
 - 9 : 16
 - 16 : 9
- Panjang sebuah roket yang hendak diluncurkan ke angkasa adalah 120 m. Roket tersebut diluncurkan dan bergerak dengan kecepatan $0,6c$ terhadap Bumi. Menurut pengamat di Bumi panjang roket tersebut selama bergerak adalah
 - 60 m
 - 72 m
 - 80 m
 - 96 m
 - 120 m
- Besar kecepatan sebuah mistar (panjang 2 m) agar panjangnya teramati sebesar 1 m dari laboratorium adalah
 - $\frac{c}{2}$
 - $\frac{\sqrt{3}}{2}$
 - $\frac{c}{3}$
 - $\frac{2c}{3}$
 - $\frac{\sqrt{2}}{3}$
- Seorang astronaut mengamati sebuah pesawat angkasa yang diam relatif terhadapnya memiliki penampang berbentuk lingkaran dengan jari-jari R . Apabila pesawat angkasa tersebut bergerak mendekati astronaut dengan kelajuan $0,8c$, penampang pesawat tersebut tampak berbentuk
 - lingkaran dengan jari-jari $< R$
 - lingkaran dengan jari-jari $= R$
 - oval dengan diameter kecil $< R$ dan diameter besar $= R$
 - oval dengan diameter besar $> R$ dan diameter kecil $= R$
 - lingkaran dengan jari-jari $> R$
- Sebuah mobil cepat melintas di depan seseorang yang tengah berdiri di pinggir jalan. Orang tersebut mencatat waktu yang diperlukan mobil untuk melintasi dirinya adalah 10 ns. Jika panjang mobil dalam keadaan diam 3 m, kelajuan mobil saat itu adalah

- a. $\frac{1}{2}c$ d. $\frac{1}{4}c\sqrt{5}$
 b. $\frac{1}{2}c\sqrt{2}$ e. c
 c. $\frac{1}{2}c\sqrt{3}$
12. Sebuah tangki berbentuk kubus memiliki volume 1 m^3 , jika diamati oleh pengamat yang diam terhadap kubus tersebut. Apabila pengamat bergerak relatif terhadap kubus dengan kecepatan $0,8c$ sepanjang rusuk kubus, volume kubus yang teramati adalah
 a. $0,2 \text{ m}^3$ d. $0,6 \text{ m}^3$
 b. $0,4 \text{ m}^3$ e. $0,8 \text{ m}^3$
 c. $0,5 \text{ m}^3$
13. Jika kelajuan partikel $2,4 \times 10^8 \text{ m/s}$, perbandingan massa relativistik partikel itu terhadap massa diamnya adalah
 a. $5 : 3$ d. $25 : 4$
 b. $25 : 9$ e. $8 : 5$
 c. $5 : 4$
14. Jika massa elektron adalah dua kali massa diamnya, kelajuan elektron tersebut sebesar
 a. $\frac{1}{2}c$ d. $\frac{1}{4}c\sqrt{5}$
 b. $\frac{1}{2}c\sqrt{2}$ e. c
 c. $\frac{1}{2}c\sqrt{3}$
15. Sebuah proton dengan massa diam $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ bergerak dengan kelajuan $1,8 \times 10^8 \text{ m/s}$. Momentum proton adalah
 a. $1,88 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
 b. $3,01 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
 c. $3,76 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
 d. $5,64 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
 e. $6,85 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
16. Cahaya Matahari berasal dari perubahan massanya menjadi energi. Jika laju perubahan massa tersebut $4 \times 10^4 \text{ kg/s}$ dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, daya yang diradiasikan Matahari adalah
 a. $1,2 \times 10^{21} \text{ W}$ d. $4,8 \times 10^{21} \text{ W}$
 b. $2,4 \times 10^{21} \text{ W}$ e. $5,4 \times 10^{21} \text{ W}$
 c. $3,6 \times 10^{21} \text{ W}$
17. Satu gram massa diubah menjadi energi. Energi ini digunakan untuk memindahkan beban sampai ketinggian 100 m . Massa beban maksimum adalah
 a. $3 \times 10^{10} \text{ kg}$ d. $7,5 \times 10^{10} \text{ kg}$
 b. $4,5 \times 10^{10} \text{ kg}$ e. $9 \times 10^{10} \text{ kg}$
 c. $6 \times 10^{10} \text{ kg}$
18. Jika m_0 adalah massa diam benda dan c adalah kecepatan rambat cahaya di dalam hampa, energi total benda yang bergerak dengan kecepatan v adalah

- a. $\frac{1}{2}m_0c^2$ d. $\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
 b. $\frac{1}{2}m_0(2c^2 + v^2)$ e. $m_0c^2\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$
 c. $m_0(c^2 + v^2)$

19. Sebuah elektron yang memiliki massa diam m_0 dan bergerak dengan kecepatan $0,6c$ memiliki energi kinetik sebesar ...
 a. $0,25 m_0c^2$ d. $1,6 m_0c^2$
 b. $0,36 m_0c^2$ e. $2,5 m_0c^2$
 c. m_0c^2
20. Agar energi kinetik benda bernilai 25% dari energi diamnya dan c adalah kelajuan cahaya di ruang hampa, benda harus bergerak dengan kelajuan
 a. $\frac{c}{4}$ d. $\frac{3c}{4}$
 b. $\frac{c}{2}$ e. $\frac{4c}{5}$
 c. $\frac{3c}{5}$
21. Kelajuan partikel yang memiliki energi kinetik sama dengan energi diamnya adalah
 a. $0,5c$ d. $0,87c$
 b. $0,66c$ e. $0,98c$
 c. $0,75c$
22. Suatu partikel bertenaga rehat E_0 sedang bergerak dengan tenaga kinetik EK dan kecepatan v sedemikian rupa sehingga $\frac{v}{c} = 0,99$. Nilai $\frac{EK}{E_0}$ untuk partikel besarnya
 a. 2 d. 9
 b. 4 e. 5
 c. 6,1
23. Sebuah elektron energi diamnya $E_0 \text{ MeV}$ dan energi totalnya $E \text{ MeV}$. Apabila c adalah kelajuan cahaya dalam ruang hampa,
 1) laju elektron $c \left\{ 1 - \left(\frac{E_0}{E} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$
 2) momentum linier elektron $= (E - E_0)^{\frac{1}{2}} c$
 3) energi kinetiknya $\{E - E_0\}$
 4) beda potensial yang diperlukan untuk mempercepatnya dari keadaan diam adalah $(E - E_0) \times 10^6 \text{ V}$.
 Pernyataan di atas yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3 d. 4
 b. 1 dan 3 e. 1, 2, 3, dan 4
 c. 2 dan 4

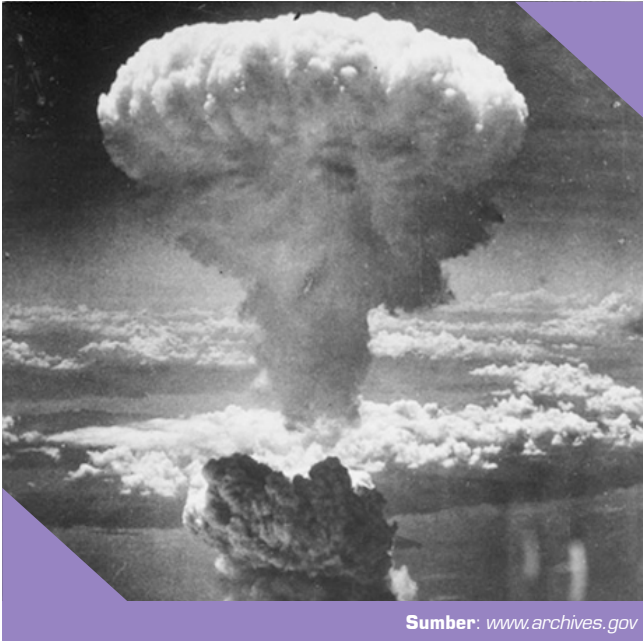


24. Usaha yang diperlukan untuk mempercepat proton dari keadaan diam sehingga memiliki kelajuan $0,98c$ adalah (Diketahui massa diam proton adalah $1,67 \times 10^{-27}$ kg dan $c = 3 \times 10^8$ m/s)
- 2×10^{-10} J
 - 3×10^{-10} J
 - 4×10^{-10} J
 - 5×10^{-10} J
 - 6×10^{-10} J
25. Jari-jari lintasan gerak proton di dalam sebuah siklotron proton adalah 120 m. Jika energi proton sebesar $1,6 \times 10^{-9}$ J, induksi medan magnet yang diperlukan adalah
- 0,02 T
 - 0,28 T
 - 1,2 T
 - 1,6 T
 - 2,5 T

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Teori relativitas berkaitan dengan peristiwa yang diamati dan diukur dari kerangka acuan inersial. Apakah yang dimaksud dengan kerangka acuan inersial?
- Dua pesawat angkasa menuju Bumi masing-masing dengan kelajuan $0,5c$ dan $0,8c$ relatif terhadap Bumi. Tentukan kelajuan relatif pesawat pertama terhadap pesawat kedua jika:
 - kedua pesawat searah, dan
 - kedua pesawat berlawanan arah.
- Jelaskan secara singkat sistem kerja interferometer Michelson beserta skema sederhananya.
- Sebuah pesawat bergerak dengan kelajuan $0,8c$ terhadap Bumi. Tentukan perubahan luas lapangan yang terukur oleh pengamat dalam pesawat. Nyatakan dalam %.
- Jelaskan postulat Einstein untuk teori Relativitas Einstein.
- Sebuah partikel elementer memiliki umur rata-rata $2,6 \times 10^{-8}$ s ketika diam. Tentukan kecepatan gerak partikel tersebut sehingga mampu menempuh jarak 10 m sebelum ia lenyap.
- Apakah implikasi dari postulat kedua Einstein?
- Proton dengan massa diam $1,67 \times 10^{-27}$ kg bergerak dengan kelajuan $2,4 \times 10^8$ m/s. Tentukan:
 - massa gerak proton,
 - momentum proton, dan
 - energi kinetik proton.
- Apakah yang dimaksud dengan:
 - relativitas kecepatan,
 - pemuluran waktu,
 - penyusutan panjang, dan
 - massa dan momenteum relativistik?
- Sebuah elektron dipercepat pada beda potensial 1.000 kV. Massa diam elektron $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan muatannya $1,6 \times 10^{-19}$ C.
 - Tentukan kelajuan elektron.
 - Berapa energi total elektron?

Fisika Inti dan Radioaktivitas



Sumber: www.archives.gov

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menunjukkan penerapan konsep Fisika inti dan radioaktivitas dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari dengan cara mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas, serta mendeskripsikan pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Pernahkah Anda mendengar istilah "bom atom"? Energi bom atom berasal dari reaksi inti tak terkendali. Kedahsyatan bom atom kali pertama dirasakan oleh warga Hiroshima dan Nagasaki, Jepang, ketika terjadi perang dunia kedua, pada 1945. Ledakan bomnya setara dengan ledakan 14 juta kg TNT (*trinitro toluena*) sehingga mengakibatkan kedua kota tersebut hancur.

Hingga saat ini, bom atom atau nuklir merupakan penghancur masal yang paling ditakuti sehingga tidak aneh lagi apabila seseorang memiliki anggapan yang negatif ketika mendengar istilah "atom" atau "nuklir". Akan tetapi, tahukah Anda bahwa dibalik stigma yang negatif, ternyata kajian mengenai atom atau teknologi nuklir telah memberikan banyak manfaat dalam kehidupan sehari-hari? Energi nuklir, dapat dimanfaatkan sebagai tenaga listrik dan penghasil radioisotop yang bermanfaat di berbagai bidang, misalnya kedokteran dan pertanian. Sangat bermanfaat, bukan?

Pembahasan mengenai inti atom dan reaksi nuklir terdapat di dalam konsep Fisika Inti dan Radioaktivitas. Pada bab ini, Anda akan mempelajari konsep tersebut. Jadi, pelajailah dengan saksama.

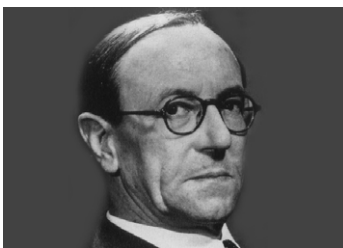
- A. Struktur Inti**
- B. Radioaktivitas**
- C. Teknologi Nuklir**

Soal Pramateri

1. Jelaskan model atom Bohr.
2. Apakah yang Anda ketahui tentang unsur radioaktif?
3. Apakah yang Anda ketahui tentang nuklir?

Jelajah Fisika

**James Chadwick
(1891–1974)**



James Chadwick, seorang murid Rutherford, berhasil menemukan jenis partikel baru yang keluar dari intinya, yaitu neutron, dengan cara mendedahkan berilium logam ke partikel. Selanjutnya, Chadwick meneliti deuterium (hidrogen berat). Isotop hidrogen ini ditemukan pada 1932 dan digunakan untuk reaktor nuklir.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

A Struktur Inti

1. Struktur dan Lambang Inti

Pada Bab 7, Anda sudah mempelajari teori dan model-model atom. Berbasis pada model atom Rutherford dan ditambah dengan beberapa postulat, Bohr berhasil menjelaskan bahwa atom dalam keadaan stabil dan spektrum yang dipancarkan atom hidrogen adalah diskrit. Model tersebut telah meletakkan dasar bahwa atom tersusun oleh inti atom yang bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif. Muatan positifnya kemudian disebut proton.

Ditemukannya struktur atom menyisakan banyak pertanyaan lanjutan. Tersusun oleh apakah inti atom itu? Apakah hanya terdiri atas proton-proton? Beberapa hasil eksperimen menunjukkan bahwa proton bukanlah satu-satunya partikel penyusun inti. Akhirnya pertanyaan tersebut terjawab setelah seorang fisikawan Inggris, **James Chadwick** (1891–1974), menemukan neutron sebagai penyusun inti selain proton. Kedua partikel penyusun inti ini disebut nukleon.

Neutron adalah partikel netral yang massanya hampir sama dengan proton. Massa proton dan neutron masing-masing adalah $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$ kg dan $m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$ kg. Jika dibandingkan dengan massa elektron, $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg, massa proton dan neutron kira-kira 1.836 kalinya. Oleh karena itu, sesuai dengan model atom Rutherford, massa atom terpusat pada inti atom.

Dari seluruh unsur yang ada di alam, hidrogen adalah unsur yang struktur intinya paling sederhana. Inti atom hidrogen hanya terdiri atas sebuah proton. Inti-inti unsur lain tersusun oleh sejumlah proton dan neutron. Jumlah proton dan neutron dalam inti suatu unsur berbeda dari unsur lainnya. Oleh karena itu, inti (atau unsur) dilambangkan berdasarkan jumlah proton dan neutron di dalamnya. Suatu unsur X yang memiliki Z proton dan A nukleon (jumlah proton dan neutron)

$${}_Z^AX \text{ atau } {}_Z^AX$$

dengan: X = nama unsur,

Z = nomor atom (jumlah proton), dan

A = nomor massa atom (jumlah proton dan neutron).

Inti atom suatu unsur ada yang memiliki nomor atom sama tetapi nomor massa berbeda. Inti seperti ini disebut *isotop*. Sebagai contoh, oksigen memiliki tiga isotop yaitu ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, dan ${}^{18}_8\text{O}$. Contoh lain, karbon juga memiliki tiga isotop, yakni ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, dan ${}^{14}_6\text{C}$. Jumlah isotop setiap unsur berbeda-beda. Meskipun nomor massanya berbeda, isotop memiliki sifat kimia yang sama.

Contoh 9.1

Tentukan jumlah proton dan jumlah neutron dalam inti oksigen ${}^{17}_8\text{O}$. Berapakah jumlah elektron atom oksigen?

Jawab

Dari lambang ${}_Z^AX$, Z = 8 dan A = 17. Dengan demikian, jumlah protonnya adalah 8 dan jumlah neutronnya A – Z = 17 – 8 = 9. Oleh karena atom oksigen netral, jumlah elektron dalam atom oksigen sama dengan jumlah protonnya, yakni 8.

Tabel 9.1 Beberapa Contoh Lambang Unsur dan Partikel

Nama Partikel	Lambang
Elektron (partikel beta)	${}^0_{-1}e$ atau ${}^0_{-1}\beta$
Positron	${}^0_1e$ atau ${}^0_1\beta$
Proton	${}^1_1p$ atau ${}^1_1H$
Neutron	${}^1_0n$
Partikel α (inti helium)	${}^4_2\alpha$ atau ${}^4_2He$

Kata Kunci

- Elektron
- Energi ikat inti
- Inti atom
- Massa defek
- Nomor atom
- Nomor massa
- Neutron
- Proton

2. Massa Defek dan Energi Ikut Inti

Selain dinyatakan dalam satuan kilogram, massa inti juga dinyatakan dalam satuan massa atom (sma). Pada satuan ini, 1 sma tepat sama dengan $\frac{1}{12}$ kali massa atom karbon (${}^{12}_6C$). Massa inti atom karbon tepat sama dengan 12,000000 sma. Hubungan antara satuan sma dan satuan kilogram adalah $1\text{ sma} = 1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$. Massa inti juga sering disetarakan dengan satuan energi dalam eV (elektron volt), yakni $1\text{ sma} = 931,5\text{ MeV}$ (mega-elektron volt).

Oleh karena inti tersusun oleh proton dan neutron, massa inti harusnya tepat sama dengan jumlah massa proton dan massa neutron (massa nukleon). Akan tetapi, kenyataannya tidaklah demikian. Massa inti selalu lebih kecil daripada massa nukleon. Selisih antara massa nukleon dan massa inti disebut massa defek. Massa defek ini berubah menjadi energi yang mengikat inti, yakni *energi ikat inti*.

Bagaimanakah cara menghitung massa defek dan energi ikat inti? Seperti telah dibahas pada subbab sebelumnya, inti dengan lambang ${}_Z^AX$ memiliki Z proton dan $(A-Z)$ neutron. Jika massa proton m_p dan massa neutron m_n , jumlah total massa proton dan neutron (massa nukleon) adalah $Zm_p + (A-Z)m_n$. Jika massa inti m , massa defeknya adalah

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

(9-1)

Dengan demikian, energi ikat inti adalah

$$E = \Delta mc^2$$

(9-2)

dengan Δm dalam satuan kg, $c = 3,0 \times 10^8\text{ m/s}$, dan E dalam satuan joule (J). Jika Δm dinyatakan dalam satuan sma, energi ikat inti memenuhi persamaan berikut.

$$E = \Delta m 931,5\text{ MeV}$$

(9-3)

Energi ikat inti berkaitan dengan jumlah energi yang harus diberikan untuk memecahkan inti menjadi proton dan neutron pembentuknya. Agar inti stabil, massa inti harus lebih kecil daripada massa nukleon sehingga diperlukan energi untuk memecahkannya.

Ada kalanya energi ikat dinyatakan untuk setiap nukleon. Energi ikat rata-rata setiap nukleon adalah energi ikat inti dibagi oleh nomor massa, yakni

$$E_0 = \frac{E}{A}$$

(9-4)

dengan E_0 = energi ikat rata-rata setiap nukleon.

Contoh 9.2

Hitunglah energi ikat rata-rata setiap nukleon untuk inti ${}^{14}_7\text{N}$, jika diketahui massa ${}^{14}_7\text{N} = 14,003074$ sma, massa proton = 1,007825 sma, dan massa neutron adalah 1,008665 sma.

Jawab

Inti ${}^{14}_7\text{N}$ terdiri atas $Z = 7$ proton dan $A - Z = 14 - 7 = 7$ neutron sehingga massa defeknya adalah

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

$$\Delta m = (7)(1,007825 \text{ sma}) + (7)(1,008665 \text{ sma}) - (14,003074 \text{ sma}) = 0,112356 \text{ sma}.$$

Selanjutnya, energi ikat intinya adalah

$$E = \Delta m 931,5 = (0,112356 \text{ sma})(931,5) = 104,7 \text{ MeV}.$$

Dengan demikian, energi ikat rata-rata setiap nukleon adalah

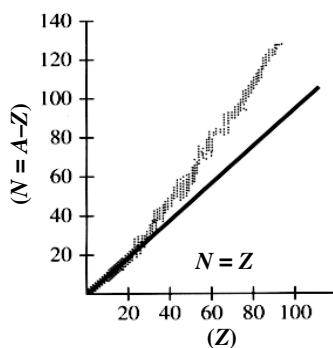
$$E_0 = \frac{E}{A} = \frac{104,7 \text{ MeV}}{14} = 7,43 \text{ MeV}.$$

3. Gaya dan Kestabilan Inti

Selain dalam tinjauan energi, Anda juga dapat menganalisis inti dalam tinjauan gaya. Seperti dijelaskan sebelumnya, inti tersusun oleh sejumlah proton dan neutron. Proton bermuatan listrik positif, sedangkan neutron tidak bermuatan atau netral. Berdasarkan Hukum Coulomb, dua muatan sejenis dalam jarak yang sangat dekat akan saling menolak dengan gaya elektrostatis yang sangat kuat (ingat gaya elektrostatis berbanding terbalik dengan kuadrat jarak). Lalu, mengapa mereka tetap berada dalam inti dan tidak saling menjauh sehingga bercerai-berai? Ini berarti ada gaya lain yang menyeimbangkan gaya elektrostatis sehingga inti dalam keadaan stabil. Gaya yang menyebabkan proton dan neutron tetap berada dalam inti disebut *gaya inti* atau *gaya nuklir*.

Gaya ikat inti merupakan gaya tarik-menarik antarnukleon. Berbeda dengan gaya elektrostatis atau gaya gravitasi, gaya inti tidak mematuhi hukum kebalikan kuadrat jarak dan bekerja dalam jangkauan pendek. Ketika jarak antarnukleonnya cukup dekat (lebih kecil dari 10^{-15} m), gaya inti sangat kuat sehingga mampu mengatasi gaya tolak elektrostatis.

Gambar 9.1 menunjukkan grafik jumlah neutron (N) terhadap jumlah proton (Z), dalam inti. Garis $N = Z$ digambarkan sebagai acuan. Jika inti memiliki terlalu banyak proton atau terlalu banyak neutron, inti menjadi tidak stabil. Inti ringan ($Z < 30$) cenderung akan stabil jika memiliki jumlah proton dan neutron sama ($N = Z$). Inti-inti yang memiliki nomor atom antara 30 dan 83 cenderung akan stabil jika $N \approx 1,6 Z$. Sementara itu, inti-inti dengan $Z > 83$ adalah inti-inti yang tidak stabil.



Gambar 9.1

Grafik kestabilan inti.

Soal Penguasaan Materi 9.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Unsur kalium dilambangkan oleh ${}^{39}_{19}\text{K}$. Tentukan:
 - jumlah proton,
 - jumlah neutron, dan
 - jumlah elektron ion kalium.
- Inti suatu unsur memiliki 3 proton dan 4 neutron. Tuliskan lambang unsur tersebut.
- Perbandingan massa dan muatan suatu unsur sama dengan perbandingan massa dan muatan partikel α . Manakah di antara unsur berikut yang memenuhi pernyataan tersebut? Apakah ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{16}_8\text{O}$, atau ${}^{12}_6\text{C}$?

4. Diketahui massa diam elektron $9,11 \times 10^{-31}$ kg.
 - a. Nyatakan massa elektron tersebut dalam satuan sma.
 - b. Setara dengan energi berapakah massa tersebut (dalam MeV)?

5. Diketahui massa inti helium 4,0026 sma, massa proton 1,0078 sma, dan massa neutron 1,0086 sma.
 - a. Tentukan massa defek dan energi ikat helium.
 - b. Berapakah energi ikat rata-rata inti helium tersebut per nukleon?

B Radioaktivitas

Hampir duapertiga inti atom unsur di alam tidak stabil. Seperti telah dibahas pada subbab sebelumnya, inti atom dengan $Z > 83$ merupakan inti yang tidak stabil. Untuk mencapai kestabilan, inti secara spontan akan memancarkan partikel-partikel radioaktif. Peristiwa pemancaran partikel-partikel radioaktif secara spontan ini disebut *radioaktivitas*.

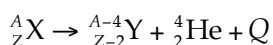
1. Pemancaran Partikel-Partikel Radioaktif

Umumnya, partikel-partikel radioaktif yang dipancarkan inti tidak stabil adalah partikel α , partikel β , dan sinar γ . Peristiwa radioaktivitas pertama kali ditemukan oleh Henry Becquerel (1852–1908).

a. Pemancaran Partikel Alfa (α)

Partikel α adalah inti helium yang dipancarkan oleh suatu inti yang tidak stabil. Oleh karena itu, lambang partikel α sama dengan lambang inti helium (${}^4_2\text{He}$). Partikel α bermuatan positif, $(+2e)$, dan ketika bergerak di udara akan menimbulkan ionisasi yang cukup besar, paling besar dibandingkan dengan partikel β dan sinar γ . Akan tetapi, daya tembusnya paling rendah dibandingkan dengan daya tembus partikel β dan sinar γ , bahkan partikel α tidak dapat menembus kertas.

Inti atom suatu unsur yang memancarkan partikel α akan mengalami pengurangan empat nomor massa dan dua nomor atom. Secara umum, proses pemancaran partikel α dituliskan dalam bentuk persamaan reaksi inti sebagai berikut.



Reaksi inti tersebut menunjukkan bahwa inti X meluruh menjadi inti Y dengan memancarkan partikel α dan membebaskan energi sebesar Q .

Pada reaksi inti berlaku hukum kekekalan nomor massa dan nomor atom. Jumlah nomor atom di kiri reaksi (sebelah kiri tanda panah) sama dengan jumlah nomor atom di kanan reaksi. Demikian pula, jumlah nomor massa di sebelah kiri reaksi sama dengan jumlah nomor massa di sebelah kanan reaksi.

Selain berlaku dua hukum kekekalan di atas, pada reaksi inti juga berlaku hukum kekekalan massa-energi. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah massa di sebelah kiri reaksi sama dengan jumlah massa di sebelah kanan reaksi ditambah massa yang berubah menjadi energi Q . Pada persamaan pemancaran partikel α di atas, jika m_x adalah massa inti X, m_y adalah massa inti Y, m_α adalah massa partikel α , dan Δm adalah massa yang berubah menjadi energi, berlaku

$$m_x = m_y + m_\alpha + \Delta m$$

Jelajah Fisika

**Henry Becquerel
(1852–1908)**



Saat mempelajari sinar-X (radiasi yang dapat menembus materi-materi tertentu), Henry Becquerel (1852–1908) terbentur pada satu jenis radiasi penembus yang tak tampak. Pada 1896, Becquerel menemukan bahwa kristal senyawa dapat memberi bayangan "berkabut" dalam film fotografi, sekalipun film dibungkus dengan kertas hitam.

Sumber: Jendela Iptek, 1997

Kata Kunci

- Partikel α
- Partikel β
- Radioaktivitas
- Sinar γ

sehingga massa yang berubah menjadi energi

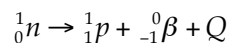
$$\Delta m = m_x - (m_y + m_\alpha) \quad (9-5)$$

dan energi yang dibebaskan

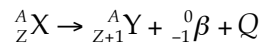
$$Q = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \quad (9-6)$$

b. Pemancaran Partikel Beta β

Inti tak stabil yang memiliki jumlah neutron lebih banyak daripada jumlah protonnya akan memancarkan partikel β . Untuk mencapai kestabilan, inti akan mengubah neutron menjadi proton dengan memancarkan partikel β menurut persamaan reaksi berikut.



Partikel β memiliki daya ionisasi dan daya tembus yang besarnya di antara daya ionisasi dan daya tembus partikel α dan sinar γ . Inti yang memancarkan partikel β akan mengalami penambahan nomor atom sebesar 1, sedangkan nomor massanya tetap. Secara umum, reaksinya dituliskan sebagai berikut.

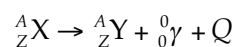


Energi yang dibebaskan dalam pemancaran partikel ini dapat ditentukan dengan menggunakan hukum kekekalan massa-energi, sama dengan cara menentukan energi yang dibebaskan pada pemancaran partikel α .

c. Pemancaran Sinar Gamma (γ)

Sinar γ adalah gelombang elektromagnetik. Sinar γ tidak bermassa dan tidak bermuatan serta diberi lambang ${}_0^0\gamma$. Dibandingkan dengan dua partikel radioaktif lainnya, sinar γ memiliki daya tembus paling tinggi, sedangkan daya ionisasinya paling rendah.

Inti yang memancarkan sinar γ tidak mengalami perubahan nomor atom maupun nomor massa. Secara umum, reaksi intinya dituliskan



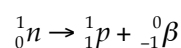
Contoh 9.3

Inti-inti ringan yang memiliki jumlah neutron lebih banyak daripada jumlah protonnya merupakan inti tidak stabil. Untuk mencapai kestabilan, neutron dalam inti tersebut akan berubah menjadi proton. Partikel apakah yang dipancarkannya?

Jawab

Lambang neutron dan proton masing-masing ${}_0^1n$ dan ${}_1^1p$. Ketika neutron berubah menjadi proton, terjadi penambahan nomor atom sebesar 1 (dari 0 menjadi 1), sedangkan nomor massa tetap, yakni 1. Sesuai dengan hukum kekekalan nomor atom dan nomor massa, partikel yang dipancarkan harus memiliki nomor atom -1

dan nomor massa 0. Partikel ini tidak lain adalah partikel β (${}_{-1}^0\beta$). Reaksi inti peristiwa di atas sebagai berikut.



Rumus integral:

- $\int k \, dx = kx + c$

- $\int \frac{1}{x} \, dx = \ln x + c$

dengan c = konstanta real.

Jadi, inti-inti ringan yang memiliki jumlah neutron lebih banyak dari jumlah proton akan memancarkan partikel β . (Catatan: ini merupakan salah satu kemungkinan. Kemungkinan lainnya adalah dengan cara menangkap positron).

2. Peluruhan Inti

Inti radioaktif senantiasa memancarkan partikel radioaktif. Pemancaran partikel radioaktif ini menyebabkan jumlah inti atomnya berkurang atau mengalami peluruhan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa laju peluruhan inti sebanding dengan jumlah inti pada saat itu dan secara matematis dituliskan

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (9-7)$$

dengan: $\frac{dN}{dt}$ = laju peluruhan,

N = jumlah inti pada waktu tertentu, dan

λ = konstanta peluruhan.

Tanda negatif pada **Persamaan (9-7)** menunjukkan bahwa jumlah inti yang meluruh selalu berkurang setiap saat. Laju peluruhan disebut juga *aktivitas radioaktif*, diberi simbol A dan diambil nilai positifnya,

$$A = \lambda N \quad (9-8)$$

Aktivitas radioaktif dinyatakan dalam satuan peluruhan per sekon atau becquerel (Bq), dengan 1 Bq = 1 peluruhan/sekon. Selain dalam satuan Bq, aktivitas radioaktif juga sering dinyatakan dalam satuan curie (Ci), dengan 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

Jumlah inti pada waktu t tertentu dapat ditentukan sebagai berikut. Dari **Persamaan (9-7)** dapat diperoleh

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Integrasikan kedua ruas

$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$$

$$\ln N \Big|_{N_0}^{N(t)} = -\lambda t \Big|_0^t$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

sehingga diperoleh

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (9-9)$$

dengan: $N(t)$ = jumlah inti pada saat t , dan

N_0 = jumlah inti mula-mula atau saat $t = 0$.

Persamaan (9-9) disebut *Hukum Peluruhan Radioaktif*.

Kata Kunci

- Hukum perubahan radioaktif
- Peluruhan inti
- Waktu paruh

Konstanta peluruhan λ berbeda untuk setiap unsur. Untuk memudahkan perhitungan, didefinisikan suatu besaran yang disebut *waktu paruh*, yakni waktu yang diperlukan unsur untuk meluruh sehingga tersisa setengahnya. Sesuai

definisi, ketika $t = T =$ waktu paruh, $N = \frac{1}{2} N_0$ maka dari **Persamaan (9-4)**

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

Selanjutnya ambil harga logaritma naturalnya (ln) maka

$$\ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T}$$

$$-\ln 2 = \lambda T$$

sehingga

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T} \quad (9-10)$$

Dalam kaitannya dengan waktu paruh, jumlah inti yang tersisa pada waktu t dapat dituliskan sebagai berikut. Masukkan **Persamaan (9-10)** ke **Persamaan (9-9)** maka

$$N(t) = N_0 e^{\frac{\ln 2}{T} t} = N_0 e^{(\ln 2) \left(\frac{t}{T} \right)} = N_0 \left(e^{-\ln 2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

Nilai $e^{-\ln 2} = \frac{1}{2}$ maka diperoleh

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (9-11)$$

Secara skematik, jumlah inti yang tersisa setiap waktu peluruhan selama T sebagai berikut.

$$N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{2} N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{4} N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{8} N_0 \rightarrow \dots$$

Dengan kata lain, setiap meluruh selama waktu paruh, inti akan tersisa setengahnya dari jumlah sebelumnya. Jika semula jumlah inti adalah N_0 , dalam

waktu satu kali waktu paruh jumlah inti tersisa $\frac{1}{2} N_0$, dalam waktu dua kali

waktu paruh tersisa $\frac{1}{4} N_0$, dalam waktu tiga kali waktu paruh tersisa $\frac{1}{8} N_0$

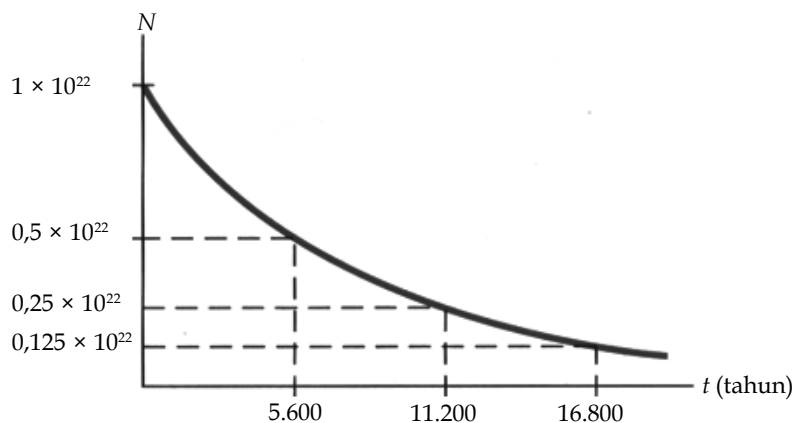
dan seterusnya. Sebagai contoh jumlah inti sebagai fungsi waktu untuk unsur $^{14}_6\text{C}$ ditunjukkan pada **Gambar 9.2**.

Perlu Anda

Ketahui

ln merupakan logaritma natural yang dirumuskan sebagai berikut.

$\ln x = {}^e\log x$
dengan $e = 2,178$ disebut bilangan natural.



Gambar 9.2

Grafik jumlah inti $N(t)$ terhadap waktu t untuk unsur $^{14}_6\text{C}$.

Contoh 9.4

100 gram unsur X dengan waktu paruh 10 hari meluruh menjadi unsur Y. Pada saat X tepat telah meluruh selama 1 bulan, tentukan:

- jumlah unsur X yang tersisa,
- jumlah unsur Y, dan
- konstanta peluruhannya?

Jawab

Diketahui: $N_0 = 100$ gram, $T = 10$ hari, dan $t = 1$ bulan ≈ 30 hari. Perhatikan bahwa

$\frac{t}{T} = \frac{30 \text{ hari}}{10 \text{ hari}} = 3$. Dengan kata lain, unsur telah meluruh selama tiga kali waktu

paruh. Dari skema peluruhan

$$N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{2}N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{4}N_0 \xrightarrow{T} \frac{1}{8}N_0 \xrightarrow{T} \dots$$

unsur yang tersisa setelah tiga kali waktu paruh ($3T$) adalah $\frac{1}{8}N_0$. Dengan demikian:

- Unsur X yang tersisa setelah 1 bulan adalah

$$N(t) = \frac{1}{8}N_0 = \frac{1}{8}(100 \text{ gram}) = 12,5 \text{ gram}.$$

- unsur Y yang terbentuk sama dengan unsur X mula-mula dikurangi unsur X yang tersisa, yaitu $100 \text{ gram} - 12,5 \text{ gram} = 87,5 \text{ gram}$.
- Konstanta peluruhannya adalah

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{10 \text{ hari}} = 0,0693 \text{ per hari}.$$

Catatan: Unsur yang tersisa juga ditentukan menggunakan **Persamaan (9-11)**,

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} = (100 \text{ gram}) \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{30}{10}} = (100 \text{ gram}) \left(\frac{1}{2} \right)^3 = (100 \text{ gram}) \left(\frac{1}{8} \right) = 12,5 \text{ gram}.$$

Kata Kunci

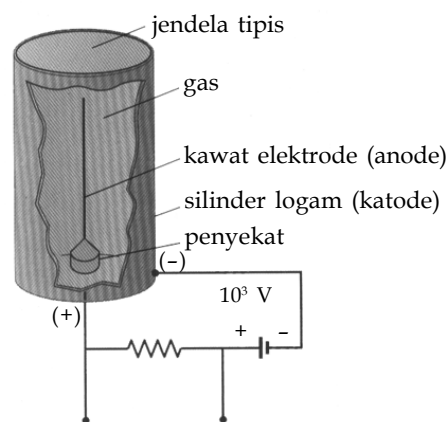
- Detektor radiasi
- Emulsi film
- Kamar kabut
- Pencacah Geiger-Muller

3. Detektor Radiasi

Partikel-partikel radioaktif tidak dapat dilihat oleh mata dan berbahaya. Oleh karena itu, diperlukan suatu alat untuk mendeteksi (mengetahui) keberadaannya. Alat pendeteksi partikel-partikel radioaktif disebut *detektor radiasi* atau *detektor nuklir*. Beberapa detektor radiasi di antaranya pencacah Geiger-Muller, emulsi film, kamar kabut, dan detektor sintilasi.

a. Pencacah Geiger-Muller

Detektor yang paling banyak digunakan adalah pencacah Geiger-Muller. Detektor tersebut, seperti diperlihatkan pada **Gambar 9.3**, terdiri atas tabung logam silindris yang diisi dengan jenis gas tertentu dengan tekanan rendah (sekitar 10 cmHg). Seutas kawat diletakkan di sepanjang sumbu silinder dan dipertahankan pada beda potensial yang sangat tinggi, sekitar 1.000 volt, relatif terhadap tabung.



Gambar 9.3

Pencacah Geiger-Muller.

Ketika sebuah partikel radioaktif bermuatan berenergi tinggi masuk melalui jendela tipis pada salah satu ujung tabung, beberapa atom gas dalam tabung akan terionisasi. Elektron-elektron yang lepas dari atom akan tertarik pada kawat positif dengan kecepatan yang semakin tinggi dan ketika menumbuk atom lainnya, elektron-elektron akan mengionisasi atom tersebut. Peristiwa ini akan menghasilkan timbunan elektron dan segera longsor menghasilkan pulsa tegangan. Pulsa tegangan ini diperkuat oleh penguat (*amplifier*), kemudian dikirimkan ke pencacah elektronik. Pencacah elektronik inilah yang menerjemahkan pulsa tegangan sebagai jumlah cacahan atau jumlah partikel yang terdeteksi.

b. Emulsi Film

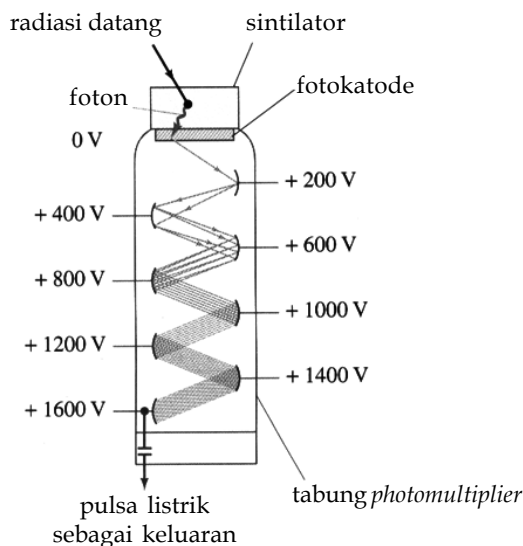
Detektor film digunakan untuk melihat jejak-jejak partikel bermuatan. Partikel yang melewati lapisan emulsi film akan mengionisasi atom-atom yang dilaluinya. Ionisasi ini menghasilkan perubahan Kimia dan ketika emulsi dikembangkan, jejak partikel akan terlihat.

c. Kamar Kabut

Pada kamar kabut, gas didinginkan sedemikian sehingga suhunya sedikit di bawah titik embunnya. Molekul-molekul gas mulai mengembun ketika ada molekul terionisasi. Jadi, ion-ion terbentuk ketika partikel bermuatan melintasi pusat pengembunan sehingga terbentuk tetes-tetes kabut. Cahaya yang terhambur dari tetes-tetes kabut lebih banyak daripada cahaya yang terhambur dari gasnya sehingga foto kamar kabut pada saatnya akan menunjukkan jejak partikel. Saat ini, kamar kabut sudah jarang digunakan.

d. Detektor Sintilasi

Detektor sintilasi menggunakan zat padat, zat cair, atau gas (secara umum disebut sintilator) yang atom-atomnya mudah tereksitasi oleh radiasi yang datang. Sesaat setelah tereksitasi, atom-atom sintilator itu segera kembali ke keadaan dasarnya sambil memancarkan foton. Ketika foton menumbuk katode, elektron dapat terlepas dari fotokatode (ingat efek fotolistrik). Elektron tersebut kemudian dipercepat oleh dinode pertama, salah satu dinode dari sederetan dinode yang ada pada tabung *photomultiplier*, seperti diperlihatkan pada **Gambar 9.4**.



Kata Kunci

- Detektor sintilasi
- Tabung *photomultiplier*

Gambar 9.4

Detektor sintilasi.

Ketika elektron menumbuk dinode pertama, elektron tersebut dapat mengeluarkan beberapa elektron lainnya. Elektron-elektron itu dipercepat oleh dinode kedua dan ketika menumbuknya, elektron-elektron yang lebih banyak akan keluar lagi dan dipercepat lagi, demikian seterusnya. Pada akhirnya, terjadi penumpukan elektron yang kemudian bergerak sekaligus (semacam longsor) sehingga terjadilah pulsa listrik sebagai keluaran dari *photomultiplier*. Pulsa listrik ini kemudian dikirimkan ke pencacah elektronik sehingga dapat dibaca. Detektor ini lebih efisien dibandingkan dengan detektor Geiger-Muller, terutama untuk sinar γ .

Soal Penguasaan Materi 9.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Tuliskanlah secara berurutan tiga sinar radioaktif, berdasarkan:
 - daya tembus, dan
 - daya ionisasi dari yang paling kecil.
- Di antara ketiga sinar radioaktif, manakah yang tidak dipengaruhi oleh medan listrik atau medan magnet? Mengapa?
- Pada persamaan reaksi inti berikut, tentukan nama x dan y
 - ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + x$
 - ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + y$
- Jika dalam waktu dua hari suatu unsur radioaktif yang meluruh tinggal setengahnya, tentukan persentase unsur yang tersisa setelah ia meluruh selama
 - 4 hari,
 - 6 hari, dan
 - 8 hari.
- Massa unsur P mula-mula 500 gram. Unsur P meluruh menjadi unsur Q dengan konstanta peluruhan 0,0693 pertahun.
 - Tentukan waktu paruh unsur P.
 - Berapa massa unsur Q yang terbentuk saat P meluruh selama 20 tahun?
- Sebuah fosil ditemukan. Aktivitas C-14 yang dipancarkan fosil tersebut tinggal 6,25% dari aktivitas C-14 ketika ia masih hidup. Diketahui waktu paruh C-14 adalah 5.600 tahun. Berapakah umur fosil tersebut?

Kata Kunci

- Reaksi fisi
- Reaksi fusi
- Reaksi nuklir
- Reaktor nuklir

Jelajah Fisika

Radiasi Cherenkov



Pancaran cahaya biru yang mengerikan di pusat reaktor nuklir dinamakan radiasi Cherenkov. Pancaran cahaya tersebut disebabkan oleh elektron dari bahan bakar radioaktif yang menabrak air dan mengeluarkan cahaya. Reaksi berantai dalam reaktor nuklir dapat dikendalikan dengan batang yang mengandung bahan penyerap neutron seperti kadmium. Panas inti reaktor yang dahsyat dibawa oleh gas, logam cair, atau air bertekanan tinggi.

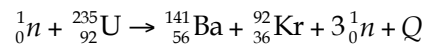
Sumber: *Jendela Iptek*, 1997

C Teknologi Nuklir

1. Reaksi Nuklir

Selain dapat terjadi secara spontan seperti pada radioaktivitas, pembentukan inti baru juga dapat dilakukan secara buatan. Inti baru dapat dibentuk dengan menembakkan partikel berenergi tinggi pada inti sasaran.

Sebagai contoh, ${}_{92}^{235}\text{U}$ dapat terbelah menjadi dua unsur lain, ${}_{56}^{141}\text{Ba}$ dan ${}_{36}^{92}\text{Kr}$, ketika ia ditembak oleh sebuah neutron. Persamaan reaksinya,

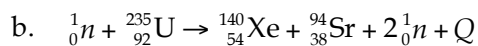
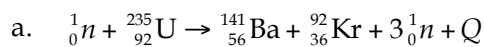


Reaksi seperti ini disebut *reaksi nuklir*.

Seperti pada radioaktivitas, selain berlaku hukum kekekalan nomor atom dan hukum kekekalan nomor massa, pada reaksi nuklir juga berlaku hukum kekekalan massa-energi. Dengan menggunakan hukum kekekalan massa-energi ini, Anda dapat menentukan nilai energi (Q) yang dibebaskan atau yang diperlukan. Secara umum, Q dapat bernilai positif dan negatif. Ketika Q bernilai positif, reaksinya dikatakan *eksoterm* (membebaskan energi). Sebaliknya, ketika Q bernilai negatif, reaksinya dikatakan *endoterm* (menyerap energi).

2. Reaksi Fisi

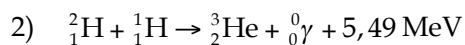
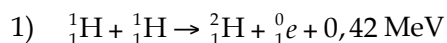
Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti yang lebih ringan. Beberapa contoh reaksi fisi sebagai berikut.



Reaksi fisi selalu menghasilkan energi. Reaksi fisi dapat berlangsung secara berantai dan akan menghasilkan energi yang sangat dahsyat. Bom atom adalah bom yang energi penghancurnya berasal dari reaksi fisi berantai tak terkendali.

3. Reaksi Fusi

Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat. Seperti pada reaksi fisi, reaksi fusi pun dapat berlangsung secara berantai dan menghasilkan energi yang sangat dahsyat. Sebagai contoh, energi Matahari berasal dari penggabungan inti-inti hidrogen menjadi inti-inti helium. Reaksinya sebagai berikut.



Mahir Meneliti

Mengamati Reaksi Fisi dan Fusi Melalui Kegiatan Sederhana

Alat dan Bahan

1. Deterjen 2 mL
2. Gliserin 5 mL
3. Air 6 mL
4. Gelas ukur 10 mL
5. Mangkuk kecil (kapasitas 100 mL)
6. Dua utas kawat
7. Kayu pengaduk

Prosedur

Lakukanlah kegiatan percobaan berikut bersama teman Anda.

1. Siapkan alat dan bahan yang diperlukan.
2. Gunakanlah gelas ukur untuk mengukur 2 mL deterjen, 5 mL gliserin, dan 6 mL air, kemudian masukkan ke dalam mangkuk kecil.
3. Aduklah campuran tersebut sehingga diperoleh larutan yang merata.
4. Buatlah dua kawat melingkar untuk membuat gelembung sabun.
5. Masukkan kedua kawat ke dalam larutan, kemudian tiuplah secara perlahan sehingga gelembung sabun yang ukurannya sedikit lebih besar dari kawat melingkar.
6. Tangkaplah kedua gelembung dengan setiap kawat melingkar sehingga gelembung tersebut menempel pada kawat.
7. Dekatkan kedua kawat sehingga kedua gelembung menempel dan berubah menjadi gelembung yang lebih besar. Pada peristiwa tersebut, jika dihubungkan dengan teknologi nuklir, proses apakah yang terjadi?
8. Setelah itu, jauhkan kedua kawat sehingga gelembung yang besar akan berubah kembali menjadi dua gelembung yang kecil. Proses apakah yang terjadi pada peristiwa tersebut?
9. Lakukanlah analisis terhadap percobaan yang telah Anda lakukan. Berdiskusilah dalam kelompok belajar Anda.
10. Apakah yang dapat Anda simpulkan dari hasil kegiatan sederhana tersebut?
11. Laporkan hasil kegiatan dan kesimpulan yang Anda buat dan presentasikanlah di depan kelas.

Contoh 9.5

Diketahui massa ${}^2_1\text{H} = 2,0141 \text{ sma}$, ${}^3_1\text{H} = 3,0160 \text{ sma}$, ${}^4_2\text{He} = 4,0026 \text{ sma}$, ${}^1_0\text{n} = 1,0087 \text{ sma}$, dan $1 \text{ sma} = 931,5 \text{ MeV}$. Tentukan energi yang dibebaskan pada reaksi inti berikut: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Jawab

Hukum kekekalan massa-energi,

$$\Delta m = (m_{{}^2_1\text{H}} + m_{{}^3_1\text{H}}) - (m_{{}^4_2\text{He}} + m_{{}^1_0\text{n}}) = (2,0141 \text{ sma} + 3,0160 \text{ sma}) - (4,0026 \text{ sma} + 1,0087 \text{ sma}) \\ = 0,0188 \text{ sma}$$

Dengan demikian, energi yang dibebaskan adalah

$$Q = \Delta m 931,5 = (0,0188)(931,5) \text{ MeV} = 17,512 \text{ MeV}.$$

4. Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi fisi berantai terkendali. Reaktor nuklir dimanfaatkan sebagai penghasil tenaga atau daya dan penghasil radioisotop.

Gambar 9.5 memperlihatkan diagram sederhana sebuah reaktor nuklir. Berikut ini komponen-komponen utama reaktor nuklir beserta fungsinya.

- a. Bahan bakar: uranium-235 yang diperkaya.
- b. Moderator: selain berfungsi untuk memperlambat laju neutron, juga berfungsi sebagai pendingin.
- c. Batang kendali: untuk mengendalikan populasi/jumlah neutron.
- d. Perisai: untuk mencegah radiasi agar tidak sampai ke lingkungan luar.

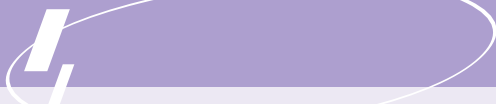
Jelajah Fisika

Batang Reaktor



Batangan bahan bakar ini digunakan untuk reaktor nuklir Magnox. Batang panjang ini terbuat dari uranium alami, dibungkus dengan magnox, suatu alat campuran magnesium. Dalam reaktor, gas karbon dioksida mengalir mengelilingi batang, membawa kalor yang dihasilkan.

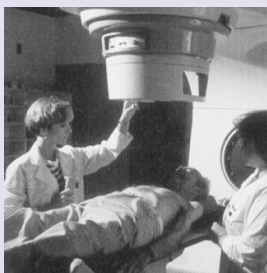
Sumber: Jendela Iptek, 1997



Gambar 9.5

Diagram sederhana reaktor nuklir.

Loncatan Kuantum



Radioterapi menggunakan radiasi yang dosisnya diatur secara hati-hati untuk membunuh sel-sel kanker, yaitu sel-sel hidup yang tumbuh secara tidak teratur.

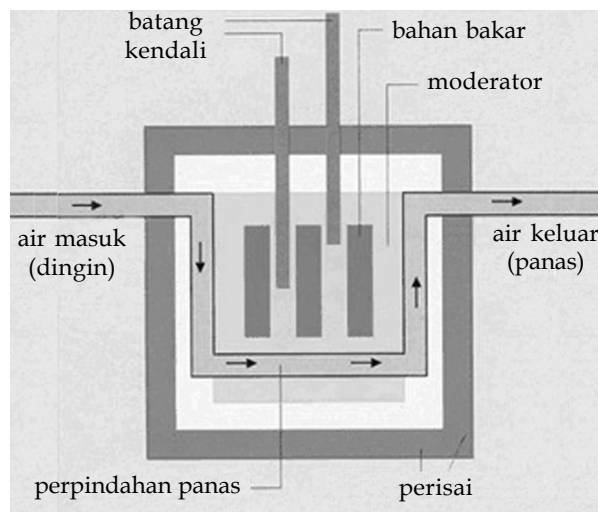
Quantum Leap

Radiotherapy uses carefully controlled doses of radiation to kill cancer cells, which are living cells that are growing in a disorderly way.

Sumber: Science Encyclopedia, 2000

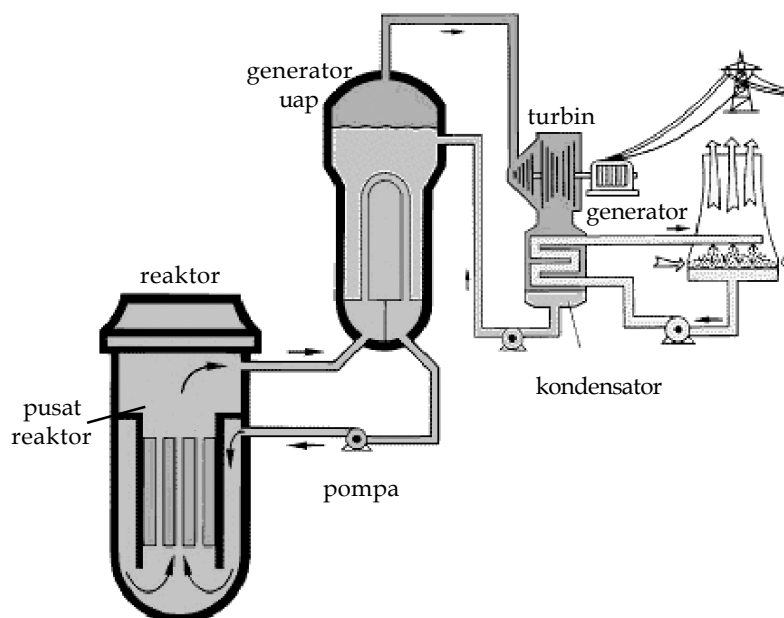
Gambar 9.6

Skema pembangkit listrik tenaga nuklir.



a. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Pada Gambar 9.6 ditunjukkan skema sebuah reaktor nuklir yang digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik. Energi yang dihasilkan oleh reaktor akan memanaskan air sehingga menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut, kemudian bergerak dengan kecepatan tinggi dan mengenai turbin uap. Ketika turbin uap berputar, ia akan memutar rotor generator listrik sehingga menghasilkan energi listrik.



b. Produksi dan Penggunaan Radioisotop

Selain digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik, reaktor nuklir juga dapat digunakan untuk memproduksi radioisotop. Radioisotop buatan adalah isotop radioaktif yang umumnya memiliki waktu paruh cukup singkat dibandingkan radioisotop alamiah. Radioisotop banyak dimanfaatkan dalam banyak hal, di antaranya sebagai berikut.

- 1) Sinar γ dapat digunakan untuk mengukur ketebalan logam secara tepat. Selain itu, sinar γ yang berasal dari Co-60 dapat digunakan untuk membunuh sel-sel kanker.

- 2) Sinar β dapat digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa bawah tanah. Radioisotop pemancar sinar β dialirkan pada fluida dalam pipa dan selanjutnya dideteksi di atas jalur pipa. Tempat yang radiasinya paling besar disinyalir sebagai pipa yang mengalami kebocoran.
- 3) Iodium radioaktif dapat digunakan untuk memantau penyerapan iodium oleh kelenjar tiroid.
- 4) Radiasi juga dapat digunakan untuk membuat tanaman generasi baru karena radiasi dapat mengubah gen makhluk hidup.

Tahukah Anda tentang Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN)? Badan Tenaga Atom Nasional merupakan lembaga pemerintah yang mengurus bidang tenaga nuklir dan atom di Indonesia.

Sampai saat ini, Badan Tenaga Atom Nasional telah berhasil menciptakan penemuan dalam bidang atom dan nuklir dan sudah dapat diaplikasikan, di antaranya penemuan radioisotop dan radiofarmaka (radioisotop dalam bidang farmasi dan kesehatan). Berikut ini beberapa radioisotop dan radiofarmaka yang diciptakan oleh BATAN.

- Radiofarmaka ^{131}I -Lipiodol digunakan untuk terapi otak dan mematikan sel kanker.
- Radiofarmaka Sm-EDTMP digunakan untuk terapi kanker tulang serta dapat menahan rasa sakit dalam waktu lama.
- MAG-3 , merupakan radioisotop yang dapat digunakan sebagai penyidik fungsi ginjal sehingga dapat mempercepat proses ekskresi. Radioisotop MAG-3 dapat disimpan dalam waktu lama.

Radioisotop-radioisotop tersebut telah dipakai di berbagai Rumah Sakit di Indonesia, seperti Rumah Sakit Harapan Kita dan Rumah Sakit Cipto Mangunkusumo di Jakarta, Rumah Sakit Hasan Sadikin di Bandung, dan Rumah Sakit Saiful Anwar Malang.

Kerjakanlah

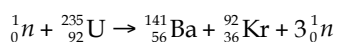
Untuk menambah pengetahuan Anda tentang dunia atom dan nuklir di Indonesia, carilah informasi melalui buku, majalah, atau internet tentang Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) dan produk-produk yang telah diciptakannya. Laporkan hasilnya dalam bentuk makalah kepada guru Fisika Anda.

Soal Penguasaan Materi 9.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Tentukan energi pembelahan uranium tiap fisi

$\left(\frac{Q}{A}\right)$ dengan reaksi fisi sebagai berikut:



Diketahui massa ${}_0^1n = 1,0087$ sma, massa ${}_{92}^{235}\text{U} = 235,0439$ sma, dan massa $(\text{Ba} + \text{Kr}) = 232,80$ sma.

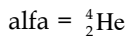
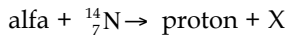
Pembahasan Soal *SPMB*

Ketika unsur $^{14}_7\text{N}$ ditembak dengan partikel alfa, maka sebuah proton dapat dibebaskan disertai oleh unsur

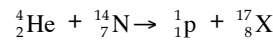
- a. $^{17}_7\text{Ne}$ d. $^{17}_9\text{F}$
 b. $^{17}_{10}\text{Ne}$ e. $^{16}_8\text{O}$
 c. $^{17}_8\text{O}$

Penyelesaian

Diketahui: sebuah reaksi inti



Pada reaksi inti berlaku hukum kekekalan nomor atom dan nomor massa:



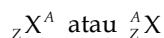
unsur X adalah $^{17}_8\text{O}$

Jawab: c

UMPTN 2001 Rayon A

Rangkuman

- Inti atom** terdiri atas proton yang bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan.
- Suatu unsur X yang inti atomnya memiliki Z proton dan A nukleon diberi lambang



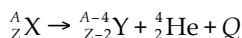
- Massa defek** adalah selisih antara massa nukleon dan massa inti

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

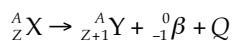
Energi ikat inti adalah energi yang berasal dari massa defek.

$$E = \Delta mc^2 \text{ atau } E = \Delta m 931 \text{ MeV}$$

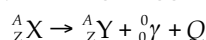
- Gaya yang menyebabkan proton dan neutron tetap berada dalam inti disebut **gaya inti** atau **gaya nuklir**.
- Peristiwa pemancaran partikel-partikel radioaktif secara spontan disebut **radioaktivitas**.
- Partikel α** memiliki daya ionisasi paling besar, tetapi daya tembusnya paling kecil dibandingkan partikel β dan sinar γ .



Partikel β memiliki daya ionisasi dan daya tembus yang besarnya di antara partikel α dan sinar γ .



Sinar γ memiliki daya ionisasi paling rendah, tetapi daya tembusnya paling tinggi.



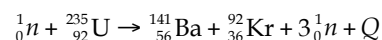
- Hukum Peluruhan Radiokatif:**

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

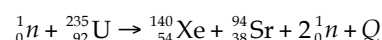
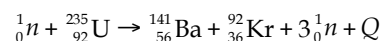
- Waktu paruh** adalah waktu yang diperlukan unsur sehingga tersisa setengahnya.

$$T = \frac{0,693}{\lambda} N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

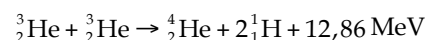
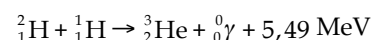
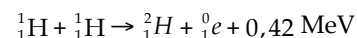
- Alat pendeteksi partikel-partikel radioaktif disebut **detektor radiasi** atau **detektor nuklir**, di antaranya pencacah Geiger-Muller, emulsi film, kamar kabut, dan detektor sintasi.
- Reaksi nuklir** adalah reaksi pembentukan inti baru, contohnya:



- Reaksi fisi** adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti yang lebih ringan.

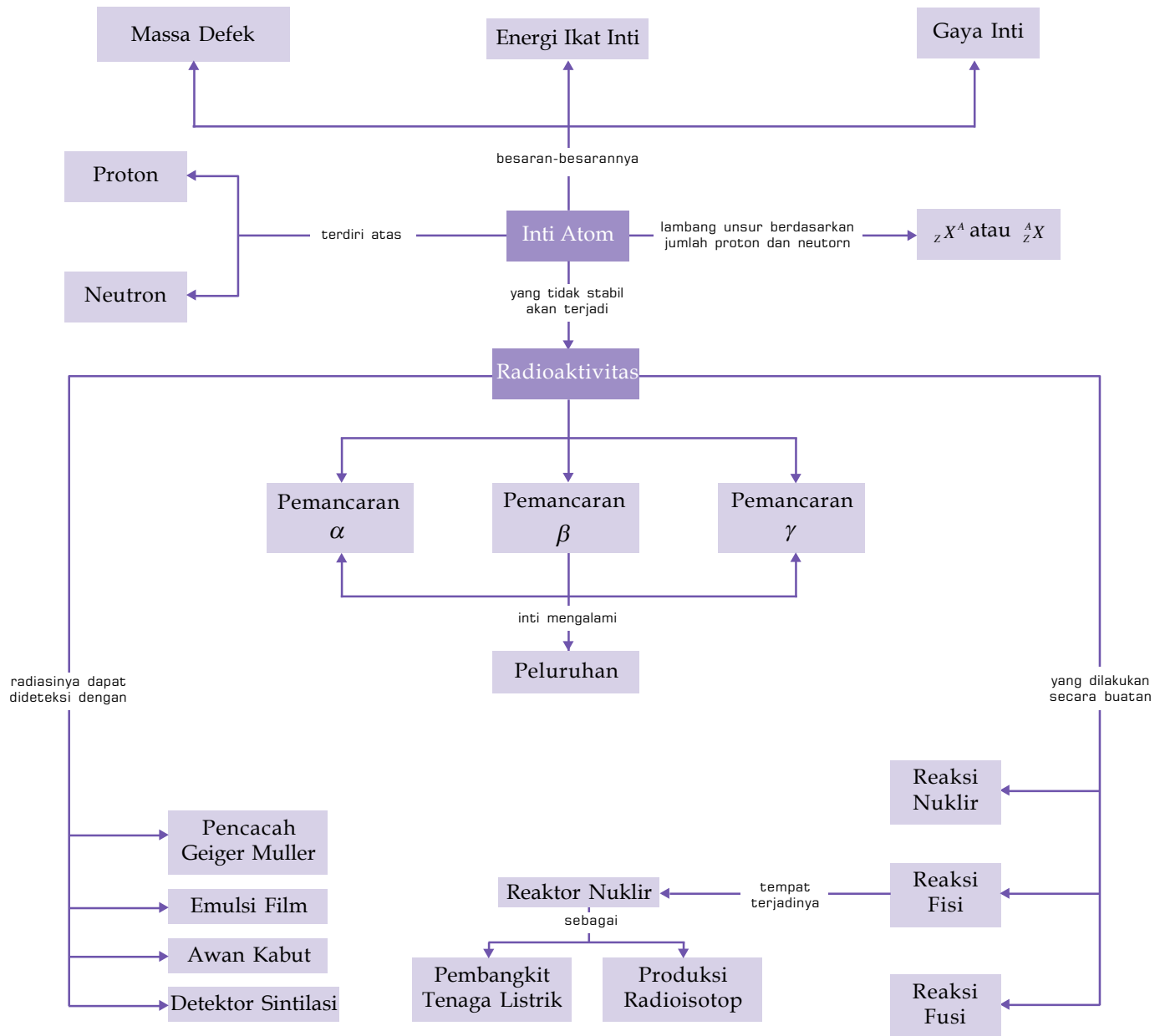


- Reaksi fusi** adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat.



- Reaktor nuklir** adalah tempat terjadinya reaksi fisi berantai terkendali. Reaktor nuklir dimanfaatkan sebagai penghasil tenaga atau daya dan penghasil radioisotop.

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Fisika Inti dan Radioaktivitas, Anda dapat mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas, serta mendeskripsikan pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari. Jika Anda belum mampu mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas, serta mendeskripsikan pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dalam kehidupan sehari-hari, Anda belum

menguasai materi bab Fisika Inti dan Radioaktivitas dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.

Evaluasi Materi Bab 9

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Dua buah nuklida dilambangkan sebagai berikut:
 $^{16}_8\text{X}$ dan $^{17}_8\text{Y}$ maka ...
 1) nuklida X memiliki 8 neutron
 2) tiap nuklida memiliki 8 proton
 3) nuklida Y memiliki 9 neutron
 4) kedua nuklida merupakan isotop
 Pernyataan yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3
 b. 1 dan 3
 c. 2 dan 4
 d. 4
 e. 1, 2, 3, dan 4
- Simbol kalium adalah $^{39}_{19}\text{K}$. Ion kalium memiliki
 1) nomor massa 39
 2) 19 proton
 3) 20 neutron
 4) 19 elektron
 Pernyataan yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3
 b. 1 dan 3
 c. 2 dan 4
 d. 4
 e. 1, 2, 3, dan 4
- Dibandingkan dengan inti atom X yang bermassa atom 207, inti atom X yang bermassa atom 206 memiliki
 a. lebih banyak neutron
 b. lebih sedikit neutron
 c. lebih banyak proton
 d. lebih sedikit proton
 e. lebih banyak elektron
- Perbandingan nomor atom dan nomor massa suatu partikel sama dengan perbandingan antara nomor atom dan nomor massa pada partikel α . Partikel tersebut adalah
 a. partikel β
 b. neutron
 c. proton
 d. inti ^2_1H
 e. inti ^7_3Li
- Isotop-isotop unsur ^3_2He dan ^4_2He dipisahkan oleh spektrometer massa maka akan didapat lintasan busur lingkaran yang jari-jarinya R_1 dan R_2 dengan perbandingan R_1 dan R_2 sebesar
 a. $\frac{5}{6}$
 b. $\frac{3}{4}$
 c. $\frac{2}{3}$
 d. $\frac{1}{2}$
 e. $\frac{2}{7}$
- Proton-proton dalam inti tetap bergabung karena adanya
 a. gaya elektrostatis
 b. gaya inti
 c. gaya gravitasi
 d. gaya elektromagnetik
 e. gaya magnetik
- Dibandingkan jumlah massa pembentuknya, massa inti
 a. selalu lebih besar
 b. selalu lebih kecil
 c. selalu sama
 d. sama atau lebih besar
 e. sama atau lebih kecil
- Massa proton $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Massa proton ini setara dengan
 a. 825,26 MeV
 b. 901,72 MeV
 c. 939,38 MeV
 d. 956,44 MeV
 e. 978,23 MeV
- Inti atom ^9_4Be memiliki massa 9,0121 sma, sedangkan massa proton dan neutron masing-masing sebesar 1,0078 sma dan 1,0086 sma. Jika 1 sma setara dengan 931,5 MeV, besar energi ikat inti ^9_4Be adalah
 a. 51,39 MeV
 b. 57,85 MeV
 c. 62,1 MeV
 d. 90,12 MeV
 e. 95,26 MeV
- Inti ringan yang memiliki jumlah neutron lebih banyak dari jumlah proton merupakan inti yang tidak stabil. Untuk mencapai kestabilan, inti tersebut akan memancarkan
 a. sinar α
 b. sinar β
 c. sinar γ
 d. positron
 e. neutron
- Suatu zat radioaktif alamiah dapat memancarkan
 1) partikel α
 2) partikel β
 3) sinar γ
 4) neutron
 Pernyataan yang benar adalah
 a. 1, 2, dan 3
 b. 1 dan 3
 c. 2 dan 4
 d. 4
 e. 1, 2, 3, dan 4

12. Di antara partikel-partikel berikut yang tidak dapat dibelokkan oleh medan listrik atau medan magnet adalah
- partikel α
 - partikel β
 - proton
 - neutron
 - positron
13. Urutan daya ionisasi sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling lemah adalah
- alfa, beta, gamma
 - gamma, alfa, beta
 - beta, alfa, gamma
 - alfa, gamma, beta
 - gamma, beta, alfa
14. Suatu inti memancarkan partikel beta. Dalam inti ini terjadi
- perubahan proton menjadi neutron
 - perubahan neutron menjadi proton
 - perubahan nomor massa
 - pengurangan energi ikat
 - pengurangan gaya tolak Coulomb
15. Ketika inti ${}^7_4\text{Be}$ berubah menjadi inti ${}^7_3\text{Li}$, prosesnya disertai dengan
- pemancaran partikel alfa
 - pemancaran elektron
 - pemancaran neutron
 - pemancaran positron
 - pemancaran neutron dan penangkapan elektron oleh inti
16. Sesudah 2 jam, suatu unsur radioaktif tersisa 6,25%. Waktu paruh unsur radioaktif tersebut adalah
- 15 menit
 - 30 menit
 - 45 menit
 - 60 menit
 - 120 menit
17. Suatu unsur meluruh dan tinggal 25% dari jumlah semula setelah setengah jam. Jika massa unsur mula-mula 160 gram, satu jam kemudian unsur telah meluruh sebanyak
- 10 gram
 - 50 gram
 - 75 gram
 - 100 gram
 - 150 gram
18. Jika suatu unsur radioaktif memiliki waktu paruh T sekon, bagian unsur tersebut yang tinggal sesudah $4T$ sekon adalah
- $\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{4}$
 - $\frac{1}{8}$
 - $\frac{1}{16}$
 - $\frac{1}{64}$
19. Suatu bahan radioaktif cesium-137 pada awalnya memiliki laju radiasi foton gamma sebesar $1,5 \times 10^{14}$ partikel tiap detik. Apabila waktu paruh bahan tersebut 30 tahun, laju radiasinya pada 10 tahun berikutnya mendekati
- $1,67 \times 10^{14}$ partikel/sekon
 - $1,5 \times 10^{14}$ partikel/sekon
 - $1,2 \times 10^{14}$ partikel/sekon
 - $0,75 \times 10^{14}$ partikel/sekon
 - $0,5 \times 10^{14}$ partikel/sekon
20. Seorang ahli purbakala mendapatkan bahwa fosil kayu yang ditemukan mengandung karbon radioaktif kira-kira tinggal $\frac{1}{8}$ dari asalnya. Jika waktu paruh karbon radioaktif adalah 5.600 tahun, umur fosil tersebut adalah
- 1.400 tahun
 - 2.800 tahun
 - 11.200 tahun
 - 16.800 tahun
 - 22.400 tahun
21. Atom ${}^{14}_7\text{N}$ dibombardir oleh partikel α sehingga terpancar sebuah proton. Inti baru yang dihasilkan peristiwa tersebut adalah
- ${}^{14}_7\text{N}$
 - ${}^{17}_8\text{O}$
 - ${}^{16}_8\text{O}$
 - ${}^{17}_9\text{F}$
 - ${}^{17}_{10}\text{Ne}$
22. Dalam reaksi inti ${}^7_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He} + x$. Nilai x adalah
- alfa
 - beta
 - gamma
 - neutron
 - proton
23. Proses penembakan inti berat oleh partikel berenergi tinggi sehingga inti berat terpecah menjadi inti-inti yang lebih ringan disebut
- reaksi fusi
 - reaksi fisi
 - reaksi berantai
 - reaksi siklus
 - reaksi kimia



24. Inti nitrogen yang ditembak oleh partikel alfa menghasilkan inti oksigen dan proton sesuai reaksi inti berikut: ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$. Diketahui massa ${}^4_2\text{He} = 4,0026 \text{ sma}$, ${}^{14}_7\text{N} = 14,00307 \text{ sma}$, ${}^{17}_8\text{O} = 16,99913 \text{ sma}$, ${}^1_1\text{p} = 1,00783$, dan $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$. Energi minimum yang diperlukan agar proses reaksi berlangsung adalah
- 0,6 MeV
 - 0,75 MeV
 - 1,2 MeV
 - 1,5 MeV
 - 2,4 MeV
25. Suatu proses fisi ${}^{235}_{92}\text{U}$ mengikuti persamaan berikut: ${}^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow \text{Ba} + \text{Kr} + 3{}^1_0\text{n}$. Jika pada proses fisi ini dibebaskan energi 200 MeV, massa neutron = 1,009 sma, massa inti ${}^{235}_{92}\text{U} = 235,01 \text{ sma}$, dan $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$, massa inti (Ba + Kr) adalah
- 231,8 sma
 - 232,8 sma
 - 233,89 sma
 - 234,03 sma
 - 234,89 sma

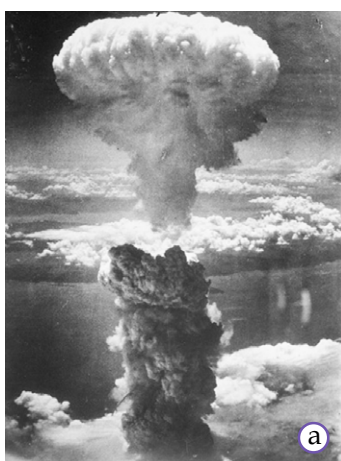
B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Jelaskanlah hubungan antara massa defek dan energi ikat inti.
- Tentukan banyaknya proton, neutron, dan elektron dalam atom-atom berikut.
 - ${}^{16}_8\text{O}$,
 - ${}^{60}_{27}\text{Co}$,
 - ${}^{138}_{56}\text{Ba}$, dan
 - ${}^{210}_{84}\text{Po}$.
- Inti tersusun oleh sejumlah proton yang bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan. Mengapa proton-proton di dalam inti tidak saling menolak sehingga bercerai-berai?
- Diketahui massa proton 1,007825 sma dan massa neutron 1,0086625 sma. Tentukan:
 - massa defek, dan
 - energi ikat per nukleon untuk inti ${}^{14}_7\text{N}$.
- Partikel-partikel radioaktif yang dipancarkan inti tidak stabil adalah partikel α , partikel β , dan sinar γ . Jelaskanlah proses:
 - pemancaran partikel α ,
 - pemancaran partikel β , dan
 - pemancaran sinar γ .
- Unsur radioaktif berkurang 87,5% dalam selang waktu 24 jam.
 - Tentukan waktu paruh unsur tersebut
 - Tentukan konstanta peluruhan unsur tersebut.
 - Berapa persenkah unsur yang tersisa setelah meluruh selama 4 hari?
- Sebutkan dan jelaskan empat macam detektor radiasi.
- Dalam reaksi inti berikut, tentukan nama partikel atau unsur X.
 - ${}^{17}_7\text{N} + \alpha \rightarrow \text{X} + \text{p}$
 - $\alpha + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{X}$
 - ${}^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + \text{X}$
- Jelaskan perbedaan antara reaksi fisi dan fusi. Tuliskan contoh dari kedua reaksi tersebut.
- Diketahui ${}^1_1\text{H} = 1,007825 \text{ sma}$, ${}^4_2\text{He} = 4,002603 \text{ sma}$, ${}^1_0\text{n} = 1,0086665 \text{ sma}$, dan $1 \text{ sma} = 931,5 \text{ MeV}$. Jika dua neutron dan dua proton bergabung membentuk inti helium, berapakah besar energi yang dibebaskan?

Kegiatan Semester 2

Pada Bab 9, Anda telah mempelajari reaksi inti beserta teknologi pemanfaatannya. Reaksi inti dapat berakibat negatif dan positif, bergantung pada pemanfaatannya. Berdasarkan teorinya yang terkenal mengenai kesetaraan antara massa dan energi (pada Bab 8), pada tahun 1939, Albert Einstein mengemukakan bahwa hubungan antara massa dan energi dapat dimanfaatkan untuk membuat bom atom agar dipakai sebagai pencegah terjadinya perang dunia kedua.

Kaitannya dengan reaksi inti adalah di dalam reaksi fisi berantai tak terkendali, inti suatu atom yang memiliki massa tertentu membelah menjadi inti-inti yang lebih ringan dan menghasilkan energi yang sangat dahsyat. Pada 1945, warga Hiroshima menjadi korban pertama kedahsyatan bom atom. Senjata tersebut menewaskan 80.000 orang seketika dan 60.000 orang lainnya meninggal dalam waktu setahun karena kesakitan akibat radiasi.



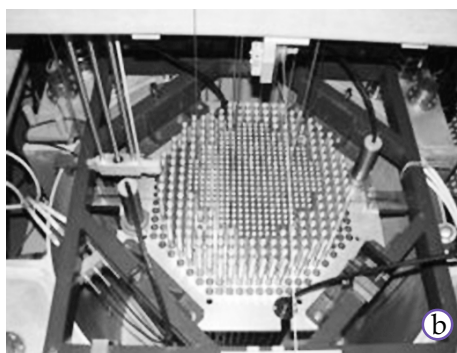
Sumber: www.archives.gov



Sumber: genchem.chem.wiss.edu

- (a) Ledakan bom atom kali pertama di Hiroshima, Jepang.
- (b) Kondisi Hiroshima setelah dibom.

Disamping akibat negatif yang ditimbulkan oleh reaksi inti, Albert Einstein juga menyatakan bahwa kesetaraan antara massa dan energi dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan tenaga listrik. Hal tersebut terbukti dengan adanya reaktor nuklir atau tempat terjadinya reaksi fisi berantai terkendali. Reaktor nuklir dimanfaatkan sebagai penghasil tenaga atau daya dan penghasil radioisotop. Di Indonesia, badan yang mengelola reaktor nuklir untuk dimanfaatkan sebagai penelitian dan produksi radioisotop adalah Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Semua stasiun pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki pusat reaktor, pengubah panas, dan turbin.



- (a) Stasiun tenaga nuklir.
- (b) Pusat reaktor yang digunakan untuk penelitian.



Pada **Kegiatan Penelitian Semester 2** ini, terdapat dua pilihan kegiatan yang dapat kamu kerjakan. Berikut adalah uraian kedua kegiatan tersebut.

Kegiatan Pilihan 1

Untuk lebih memahami terjadinya reaksi fisi berantai terkendali di dalam reaktor nuklir dan lebih mengenal perangkat-perangkat reaktor nuklir secara langsung, Anda dapat mengunjungi stasiun reaktor nuklir terdekat dari sekolah Anda. Kegiatan tersebut terdiri atas kunjungan ke stasiun reaktor nuklir di BATAN dan penyusunan laporan kegiatan. Kegiatan ini dilakukan secara berkelompok dan dikerjakan dalam waktu satu minggu. Selama proses kunjungan berlangsung, Anda dapat bertanya kepada petugas yang bersangkutan, berdiskusi dengan teman-teman sekelompok dan guru Fisika Anda, serta dapat mendokumentasikan perangkat-perangkat reaktor nuklir menggunakan kamera foto.

Setelah kunjungan Anda selesai, laporkanlah hasil kunjungan Anda dalam bentuk laporan kegiatan. Laporan kegiatan disusun secara bersama-sama dalam setiap kelompok dan diketik pada kertas HVS ukuran A4. Adapun isi laporan kegiatan terdiri atas Judul, Dasar Teori, Pembahasan, Kesimpulan dan Saran, serta Daftar Pustaka.

Kegiatan Pilihan 2

Jika kondisi sekolah Anda tidak memungkinkan untuk mengunjungi stasiun reaktor nuklir, Anda dapat melakukan **Kegiatan Pilihan 2** sebagai alternatif pada **Kegiatan Penelitian Semester 2**. Kegiatan ini berupa penyusunan makalah mengenai reaksi inti, teknologi nuklir, serta dampak positif dan dampak negatif yang ditimbulkannya. Sumber makalah dapat diperoleh dari buku-buku referensi, media masa, atau dari media internet. Kegiatan ini dikerjakan selama satu minggu dan dapat dilakukan secara berkelompok atau individu.

Jika kegiatan ini dikerjakan secara berkelompok, makalah disusun secara bersama-sama dalam setiap kelompok dan diketik pada kertas HVS ukuran A4. Adapun isi makalah tersebut meliputi Judul, Pendahuluan, Isi, Analisis, Kesimpulan dan Saran, serta Daftar Pustaka.

Selama proses kegiatan berlangsung, Anda diharapkan mampu bekerja sama dengan baik dan dapat bertanya kepada guru Fisika, jika ada hal-hal yang belum Anda pahami. Selama bekerja.

Evaluasi Materi Semester 2

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Dua buah muatan listrik $-4\ \mu\text{C}$ dan $+9\ \mu\text{C}$ masing-masing berada pada posisi (0,6) dan (8,0) pada sistem koordinat kartesius, dengan x dan y dinyatakan dalam satuan meter. Terhadap muatan $-4\ \text{C}$, kuat medan listrik bernilai nol pada jarak
 - a. 2 m
 - b. 3 m
 - c. 4 m
 - d. 6 m
 - e. 8 m
2. Faktor-faktor berikut:
 - 1) luas keping
 - 2) beda potensial antara kedua keping
 - 3) bahan di antara kedua keping
 - 4) muatan pada setiap kepingyang memengaruhi besarnya kapasitas kapasitor keping sejajar adalah
 - a. 1, 2, dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4
 - e. 1, 2, 3, dan 4
3. Lampu bertuliskan 220 V, 60 W yang dipasang pada sumber tegangan 110 V akan menghabiskan energi listrik tiap detik sebesar
 - a. 15 W
 - b. 30 W
 - c. 45 W
 - d. 60 W
 - e. 75 W
4. Seutas kawat lurus membujur arah utara-selatan dialiri arus yang arahnya ke utara. Kuat medan magnetik di sebuah titik, tepat berada di atas kawat, berarah ke
 - a. utara
 - b. selatan
 - c. barat
 - d. timur
 - e. tenggara
5. Arus listrik (dalam ampere) yang mengalir pada sebuah kumparan dengan 50 lilitan memenuhi persamaan:
$$i = 2 \sin\left(4t + \frac{1}{2}\pi\right)$$
dengan t dalam sekon. Induktansi kumparan 25 mH maka GGL induksi diri maksimum dalam kumparan adalah
 - a. 25 mV
 - b. 50 mV
 - c. 100 mV
 - d. 150 mV
 - e. 200 mV
6. Seberkas cahaya dijatuhkan pada suatu zat cair berindeks bias 1,33. Panjang gelombang cahaya di udara 6.000 Å maka panjang gelombang cahaya dalam zat cair itu adalah
 - a. 2 250 Å
 - b. 3 000 Å
 - c. 4 500 Å
 - d. 6 000 Å
 - e. 8 000 Å
7. Sebuah muatan positif 10 C dipindahkan dari titik yang berpotensi 10 V ke 60 V. Usaha yang diperlukan adalah
 - a. 5 J
 - b. 10 J
 - c. 50 J
 - d. 500 J
 - e. 600 J
8. Seberkas cahaya monokromatis dilewatkan pada dua celah sempit yang terpisah $20\ \mu\text{m}$. Pola interferensi yang terjadi ditangkap oleh layar pada jarak 0,4 m dari celah. Teramati bahwa jarak antara dua garis terang berdekatan adalah 7,2 mm. Panjang gelombang gelombang berkas cahaya itu adalah
 - a. 180 nm
 - b. 270 nm
 - c. 360 nm
 - d. 720 nm
 - e. 1.800 nm
9. Langit berwarna biru. Fenomena tersebut terjadi karena di atmosfer sinar matahari mengalami ...
 - a. hamburan
 - b. pembiasan
 - c. pemantulan
 - d. difraksi
 - e. interferensi
10. Jika perbandingan energi kinetik relativistik benda dan energi diamnya adalah 1 : 4, kecepatan gerak benda itu adalah (c = kecepatan cahaya)
 - a. 0,40c
 - b. 0,6c
 - c. 0,75c
 - d. 0,80c
 - e. 0,98c
11. Sebuah benda memancarkan energi radiasi dengan laju T joule/sekon. Jika suhu benda itu dijadikan dua kali semula, laju energi radiasi yang dipancarkannya dalam joule/sekon adalah
 - a. $\frac{1}{4}T$
 - b. $\frac{1}{2}T$
 - c. $2T$
 - d. $4T$
 - e. $16T$
12. Pemancar sebuah stasiun televisi memancarkan gelombang dengan frekuensi 300 MHz. Jika pemancar tersebut berdaya 660 kW dan konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}\ \text{Js}$, jumlah foton yang dipancarkannya tiap sekon sekitar

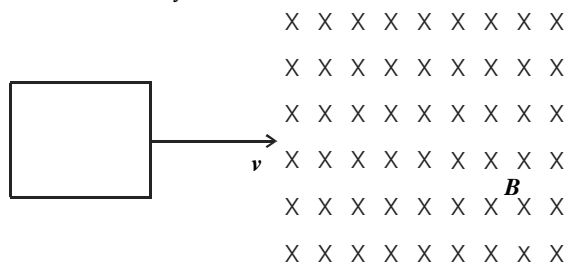


- a. 1×10^{30}
b. $1,5 \times 10^{30}$
c. $2,2 \times 10^{30}$
d. $3,3 \times 10^{30}$
e. $4,5 \times 10^{30}$
13. Sebuah elektron dipercepat dalam beda potensial 25 kV antara katode dan anode. Elektron tersebut dihentikan seketika oleh anode dan dihasilkan sinar-X. Jika konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34}$ Js. dan muatan elektron $1,6 \times 10^{-19}$ C, panjang gelombang minimum sinar-X yang terjadi adalah
a. $0,25 \text{ \AA}$
b. $0,5 \text{ \AA}$
c. $0,75 \text{ \AA}$
d. $1 \text{ \AA}$
e. $1,5 \text{ \AA}$
14. Panjang gelombang partikel bermuatan listrik positif yang dipercepat pada beda potensial V adalah λ . Jika beda potensialnya dijadikan $4V$, panjang gelombang partikelnya menjadi
a. $\frac{1}{4}\lambda$
b. $\frac{1}{2}\lambda$
c. 2λ
d. 3λ
e. 4λ
15. Perubahan momentum elektron atom hidrogen yang pindah dari kulit M ke kulit K sebesar ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js)
a. $1,1 \times 10^{-34}$ Ns
b. $2,1 \times 10^{-34}$ Ns
c. $3,3 \times 10^{-34}$ Ns
d. $4,2 \times 10^{-34}$ Ns
e. $6,6 \times 10^{-34}$ Ns
16. Konstanta Rydberg $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ maka panjang gelombang foton minimum pada deret Lyman adalah
a. $684 \text{ \AA}$
b. $811 \text{ \AA}$
c. $855 \text{ \AA}$
d. $876 \text{ \AA}$
e. $912 \text{ \AA}$
17. Jari-jari lintasan dasar elektron atom hidrogen pada model atom Bohr adalah $0,53 \text{ \AA}$. Dengan demikian, panjang gelombang elektron pada lintasan itu adalah
a. $1,67 \text{ \AA}$
b. $3,33 \text{ \AA}$
c. $5,00 \text{ \AA}$
d. $6,24 \text{ \AA}$
e. $7,49 \text{ \AA}$
18. Dalam waktu 30 hari, suatu zat radioaktif meluruh dan tersisa 6,25%. Konstanta peluruhan zat itu adalah
a. $0,0462 \text{ hari}^{-1}$
b. $0,0693 \text{ hari}^{-1}$
c. $0,0924 \text{ hari}^{-1}$
d. $0,1386 \text{ hari}^{-1}$
e. $0,2079 \text{ hari}^{-1}$
19. Inti atom ringan yang memiliki jumlah proton lebih banyak daripada jumlah neutron akan menjadi inti stabil dengan cara
a. memancarkan positron
b. memancarkan proton
c. menangkap neutron
d. memancarkan sinar gamma
e. menangkap sinar alfa
20. Sebuah elektron berada dalam medan listrik yang homogen dengan kuat medan sebesar 10^{-5} N/C . Jika massa elektron $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan besar muatan elektron $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, besar percepatan yang dialami elektron tersebut adalah
a. $2,00 \times 10^6 \text{ m/s}^2$
b. $1,85 \times 10^6 \text{ m/s}^2$
c. $1,75 \times 10^6 \text{ m/s}^2$
d. $1,50 \times 10^6 \text{ m/s}^2$
e. $1,25 \times 10^6 \text{ m/s}^2$
21. Dua kapasitor masing-masing dengan kapasitas $2 \mu\text{F}$ dan $3 \mu\text{F}$ dipasang secara seri. Beda potensial antara ujung-ujung gabungan 10 volt. Besar muatan pada kapasitor $2 \mu\text{F}$ adalah
a. $1,2 \mu\text{C}$
b. $12 \mu\text{C}$
c. $21 \mu\text{C}$
d. $30 \mu\text{C}$
e. $50 \mu\text{C}$
22. Sebuah transformator step up mengubah tegangan 25 volt menjadi 220 volt. Bagian sekundernya dihubungkan dengan lampu 40 W, 220 V. Jika lampu menyala normal dan efisiensi transformator 80%, arus pada kumparan primer adalah
a. 1 A
b. 1,25 A
c. 1,5 A
d. 2 A
e. 2,5 A
23. Jarak A ke sumber bunyi adalah 2 kali jarak B ke sumber bunyi tersebut. Perbandingan intensitas bunyi yang diterima A dan B adalah
a. 1 : 2
b. 1 : 4
c. 1 : 6
d. 2 : 1
e. 4 : 1
24. Diketahui massa proton = 1,0078 sma, massa neutron = 1,0086 sma, massa inti ${}^7_3\text{Li} = 7,0182 \text{ sma}$, dan $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$. Dengan demikian, besar energi ikat inti Li adalah
a. 37,16 MeV
b. 37,10 MeV
c. 36,87 MeV
d. 36,37 MeV
e. 23,65 MeV
25. Arah arus induksi di dalam kumparan sama dengan arah i bila arus tersebut
a. berubah nilainya
b. membesar
c. mengecil
d. tetap nilainya
e. berubah arahnya

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

- Sebuah gelombang transversal merambat dengan persamaan $y = 0,2 \sin 8\pi \left(t - \frac{x}{20} + \frac{1}{16} \right)$, dengan y dan x dalam meter, t dalam sekon. Tentukan:
 - cepat rambat gelombang, dan
 - sudut fase awal sumber gelombang.
- Seutas dawai baja dengan massa per satuan panjang $4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ ditegangkan dengan gaya 360 N. Dawai tersebut terikat pada kedua ujungnya. Salah satu frekuensi resonansinya adalah 375 Hz dan frekuensi resonansi berikutnya 450 Hz. Tentukan:
 - cepat rambat gelombang dalam dawai,
 - frekuensi nada dasar dawai, dan
 - panjang dawai.
- Sepuluh pola terang-gelap interferensi menyebar 4 cm pada layar yang letaknya 50 cm dari dua celah yang terpisah sejauh 0,1 mm.
 - Tentukan panjang gelombang cahaya yang melewati kedua celah itu.
 - Jika digunakan cahaya dengan panjang gelombang dua kali panjang gelombang pertama, berapa jauh layar harus digeser agar jarak antara terang-gelap pada layar tidak berubah?
- Pada titik-titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan panjang sisi 30 cm, terdapat muatan listrik statis masing-masing $2 \mu\text{C}$, $-3 \mu\text{C}$, dan $2 \mu\text{C}$. Tentukan gaya yang dialami setiap muatan.
- Sebuah kawat lurus panjang melintang dari timur ke barat dan dialiri arus listrik 5 A menuju ke barat. Tentukan besar dan arah medan magnetik pada titik P yang berjarak 2,5 cm dari kawat, jika titik P:
 - tepat di atas kawat,
 - tepat di bawah kawat,
 - tepat di utara kawat, dan
 - tepat di selatan kawat.
- Kumparan konduktor berbentuk persegi digerakkan memotong medan magnet seperti diperlihatkan pada gambar. Tentukan arah arus induksi pada kumparan:

- sesaat setelah memasuki medan magnet,
- selama kumparan berada dalam medan magnet, dan
- sesaat setelah keluar dari medan magnet. Tuliskan alasannya.



- Sebuah resistor dengan hambatan 600Ω , sebuah kapasitor dengan kapasitansi $5 \mu\text{F}$, dan sebuah induktor dengan induktansi 1 H disusun seri. Rangkaian ini kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan 200 V, 200 rad/s. Tentukan:
 - impedansi,
 - arus efektif,
 - sudut fase, dan
 - daya disipasi pada rangkaian.
- Ayunan sebuah bandul yang diamati di laboratorium bumi memiliki frekuensi 20 Hz. Menurut orang yang bergerak dengan kecepatan $0,8c$ relatif terhadap laboratorium, berapakah frekuensi ayunan bandul tersebut?
- Elektron atom hidrogen bertransisi dari $n = 4$ ke $n = 2$.
 - Tentukan energi yang dipancarkan atom.
 - Berapa panjang gelombangnya?
- Diketahui massa inti atom helium sebagai berikut:

$${}^1_1\text{He} = 1,007825 \text{ sma},$$

$${}^4_2\text{He} = 4,002603 \text{ sma},$$

$${}^1_0\text{He} = 1,0086665 \text{ sma}, \text{ dan}$$

$$1 \text{ sma} = 931,5 \text{ MeV}.$$
 Jika dua neutron dan dua proton bergabung membentuk inti helium, berapakah besar energi yang dibebaskan?

Evaluasi Materi Akhir Tahun

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dan kerjakanlah pada buku latihan Anda.

1. Pada permukaan suatu danau, terdapat dua buah gabus yang terpisah satu dan lainnya sejauh 60 cm. Keduanya turun naik bersama permukaan air dengan frekuensi 2 getar per sekon. Jika salah satu gabus berada di puncak bukit gelombang maka yang lainnya berada di lembah gelombang, sedangkan di antara kedua gabus tersebut terdapat satu bukit gelombang. Cepat rambat gelombang pada permukaan danau adalah
 - a. 20 cm/sekon
 - b. 30 cm/sekon
 - c. 80 cm/sekon
 - d. 120 cm/sekon
 - e. 240 cm/sekon
2. Persamaan gelombang berjalan pada dawai adalah sebagai berikut.

$$y = 2\sin\pi\left(50t - \frac{x}{5}\right)\text{cm}$$

Jika x dan y bersatuan cm dan t bersatuan sekon, pernyataan berikut ini yang benar adalah

- a. panjang gelombang 25 cm
 - b. frekuensi 10 Hz
 - c. kecepatan rambat gelombang 2,5 m/s
 - d. amplitudo gelombang 5 cm
 - e. periode 0,4 s
3. Dari sumber gelombang S , merambat gelombang dengan persamaan

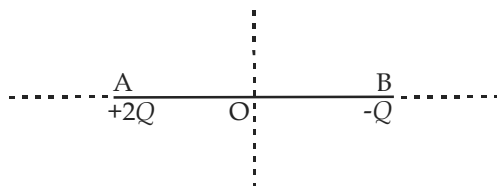
$$y = 0,04 \sin\pi\left(t - \frac{x}{6}\right),$$

satuan x dan y dalam meter, sedangkan t dalam sekon. Pada saat S telah bergetar selama 1 sekon, simpangan titik A yang terletak sejauh 1 meter dari S adalah

- a. 0,04 m
 - b. 0,03 m
 - c. 0,02 m
 - d. 0,005 m
 - e. 0,0025 m
4. Sebuah gelombang dari sumber S bergerak ke kanan dengan laju 8 m/s, frekuensi 16 Hz, dan amplitudo 4 cm. Gelombang tersebut melalui titik P yang berjarak $9\frac{1}{2}$ m dari S yang telah bergetar $1\frac{1}{4}$ sekon dan arah gerak pertamanya ke atas. Simpangan titik P pada saat itu adalah
 - a. 0 cm
 - b. 1 cm
 - c. 2 cm
 - d. 3 cm
 - e. 4 cm

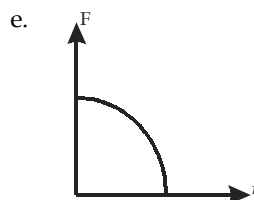
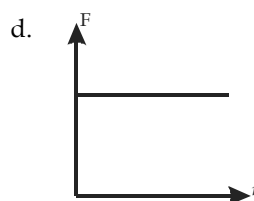
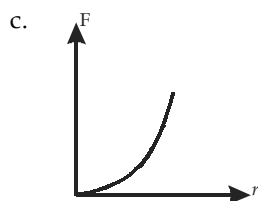
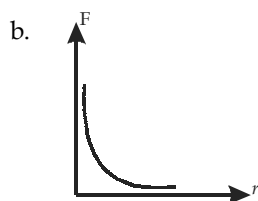
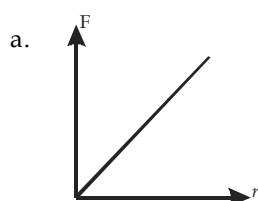
- a. massa
 - b. amplitudo
 - c. panjang gelombang
 - d. energi
 - e. fase
5. Dari suatu tempat ke tempat lainnya, gelombang memindahkan
 - a. massa
 - b. amplitudo
 - c. panjang gelombang
 - d. energi
 - e. fase
 6. Pernyataan mengenai cahaya dan bunyi berikut ini yang benar adalah
 - a. cahaya adalah gelombang longitudinal, sedangkan bunyi gelombang transversal
 - b. keduanya termasuk gelombang mekanik
 - c. cahaya tidak dapat terpolarisasi, sedangkan bunyi dapat terpolarisasi
 - d. kecepatan perambatannya sama
 - e. merambat pada medium
 7. Jika sebuah pipa organa terbuka ditiup hingga timbul nada atas kedua, terjadilah
 - a. 3 perut dan 3 simpul
 - b. 3 perut dan 4 simpul
 - c. 4 perut dan 3 simpul
 - d. 4 perut dan 3 simpul
 - e. 4 perut dan 5 simpul
 8. Intensitas bunyi dapat ditinggalkan dengan
 - a. memperbesar frekuensi dan amplitudonya
 - b. memperbesar frekuensi saja
 - c. memperkecil frekuensi dan amplitudonya saja
 - d. memperbesar amplitudonya saja
 - e. memperkecil amplitudonya dan memperbesar frekuensinya
 9. Sebuah sumber bunyi dengan frekuensi 1.024 Hz bergerak mendekati pendengar dengan kecepatan 84 m/s dan kecepatan rambat bunyi di udara 340 m/s. Jika pendengar menjauhi sumber bunyi dengan kecepatan 17 m/s, frekuensi bunyi yang diterima pendengar sama dengan
 - a. 780 Hz
 - b. 862 Hz
 - c. 1292 Hz
 - d. 1360 Hz
 - e. 1428 Hz
 10. Seberkas cahaya melewati dua celah sempit yang satu sama lain berjarak 4 mm. Jarak celah tersebut ke layar 1 m dan jarak antara dua buah garis terang yang berdekatan pada layar = $1,5 \times 10^{-2}$ cm. Panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah
 - a. 2.500 Å
 - b. 3.000 Å
 - c. 4.000 Å
 - d. 5.000 Å
 - e. 6.000 Å

11. Dua buah kutub magnet berada pada jarak 4 cm satu dengan lainnya. Kemudian, kedua kutub tersebut saling dijauhkan hingga gaya tolak-menolaknya menjadi seperempat kalinya. Jarak baru antara kedua kutub tersebut adalah
- 8 cm
 - 16 cm
 - 32 cm
 - 64 cm
 - semua jawaban tersebut tidak ada yang benar
12. Perhatikan gambar berikut ini.



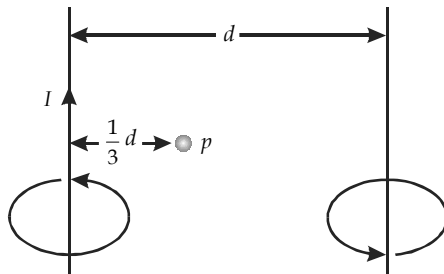
Dari gambar tersebut, O adalah titik tengah garis AB. Pada garis AB, terdapat muatan $+2Q$ di A dan $-Q$ di B. Jika R adalah letak titik yang kuat medannya sama dengan nol, R tersebut berada

- di tengah-tengah AB (pada titik O)
 - antara titik A dan O
 - antara titik O dan B
 - pada perpanjangan AB di mana $RA = \sqrt{2} RB$
 - pada perpanjangan BA di mana $RA = \sqrt{2} RB$
13. Dua buah benda bermuatan $+Q_1$ dan $+Q_2$ memiliki jarak r satu dengan lainnya. Jika jarak r diubah-ubah, grafik yang menyatakan hubungan gaya interaksi kedua muatan F terhadap r adalah



14. Sebuah kapasitor terbentuk dari dua lempeng aluminium yang luas permukaannya masing-masing 1 m^2 , dipisahkan oleh selembur kertas parafin yang tebalnya $0,1 \text{ mm}$ dan konstanta dielektriknya 2. Jika $\epsilon_0 = 9 \times 10^{-12}$, kapasitas kapasitor tersebut besarnya adalah
- $0,35 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,25 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,18 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,1 \text{ } \mu\text{F}$
 - $0,05 \text{ } \mu\text{F}$
15. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 F, 6 F, dan 9 F, dihubungkan secara seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan yang besarnya 220 V. Tegangan antara ujung-ujung kapasitor 3 F adalah
- 40 V
 - 60 V
 - 110 V
 - 120 V
 - 220 V
16. Induksi magnetik B di titik P yang berjarak d dari suatu kawat penghantar panjang berarus I dengan medium di sekitar kawat berpermeabilitas μ sama dengan
- $B = \frac{2\pi I}{\mu d}$
 - $B = \frac{\mu d}{2\pi I}$
 - $B = \frac{2\pi I d}{\mu}$
 - $B = \frac{\mu I}{2\pi d}$
 - $B = \frac{\mu I d}{2\pi}$
17. Dua buah kawat yang sangat panjang dipasang vertikal sejajar dengan jarak d . Kawat pertama dialiri arus sebesar I ke atas. Pandang titik P (dalam

bidang kedua kawat tersebut) yang terletak di antaranya dan berjarak $\frac{1}{3}d$ dari kawat pertama, seperti diperlihatkan pada gambar berikut.

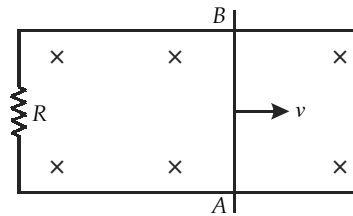


Jika induksi magnet di titik P sama dengan nol, berarti arus yang mengalir dalam kawat kedua besar dan arahnya adalah

- $\frac{1}{3} I$ ke bawah
 - $\frac{1}{2} I$ ke bawah
 - $3 I$ ke atas
 - $2 I$ ke atas
 - $2 I$ ke bawah
18. Pada dua buah kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya 2×10^{-7} . Jika jarak antara kedua kawat tersebut 1 meter, besar arus dalam setiap kawat adalah
- $\frac{1}{8} A$
 - $\frac{1}{4} A$
 - $\frac{1}{2} A$
 - $1 A$
 - $2 A$
19. Sebuah muatan sebesar $+Q$ bergerak dengan kecepatan v di dalam suatu medan magnet serba sama yang memiliki induksi magnetik B . Jika sudut yang dibentuk oleh v dan medan magnet besarnya 30° , muatan tersebut mengalami gaya sebesar
- $\frac{QB}{2v}$
 - $\frac{vB}{2Q}$
 - $\frac{Qv}{2B}$
 - $\frac{B}{2Qv}$
 - $\frac{QvB}{2}$
20. Jika sebuah kawat digerakkan sedemikian rupa sehingga memotong garis-garis gaya suatu medan magnet maka pada kedua ujung kawat tersebut

timbul gaya gerak listrik karena induksi. Kaidah tersebut dirumuskan oleh

- Maxwell
 - Lenz
 - Foucault
 - Ampere
 - Faraday
21. Perhatikan gambar berikut ini.



Kawat AB panjangnya adalah 40 cm digerakkan dalam medan magnet homogen $B = 10^{-2} T$ dengan kecepatan 20 m/s. Jika hambatan seluruh rangkaian $AB = 5 \text{ ohm}$, besar dan arah gaya Lorentz yang bekerja pada kawat AB adalah

- $2,4 \times 10^{-5} N$, ke kiri
 - $6,4 \times 10^{-5} N$, ke kanan
 - $6,4 \times 10^{-5} N$, ke kiri
 - $3,2 \times 10^{-4} N$, ke kanan
 - $3,2 \times 10^{-4} N$, ke kiri
22. Gaya gerak listrik induksi dapat ditimbulkan dengan beberapa cara, di antaranya dengan
- meletakkan kumparan kawat dalam medan magnet
 - mengerakkan kawat dalam medan magnet searah garis gaya magnet
 - memasang galvanometer pada ujung-ujung kumparan
 - mendekatkan batang magnet pada ujung kumparan
 - mengerakkan kawat dalam medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet
23. Suatu kumparan diputar dengan frekuensi f dalam medan magnet yang kuat medannya B hingga menghasilkan ggl induksi sebesar E . Jika kuat medannya diubah menjadi setengahnya dan frekuensinya dinaikkan menjadi 2 kalinya, ggl induksinya menjadi
- $4 E$
 - $2 E$
 - E
 - $0,5 E$
 - $0,25 E$
24. Sebuah transformator mengubah tegangan dari 250 V dan memiliki efisiensi 90%. Kumparan sekunder dihubungkan dengan lemari es 75 watt, 100 volt. Kuat arus pada kumparan primer adalah
- $0,25 A$
 - $0,33 A$
 - $1,68 A$
 - $1,87 A$
 - $3 A$

25. Hambatan $1.000\ \Omega$, kumparan $0,5\ \text{H}$, dan kapasitas $0,2\ \mu\text{F}$ dirangkakan seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik yang frekuensi sudutnya $5.000\ \text{rad/s}$. Harga impedansi tersebut mendekati

- $100\ \Omega$
- $500\ \Omega$
- $1.800\ \Omega$
- $1.600\ \Omega$
- $2.600\ \Omega$

26. Sebuah partikel yang memiliki massa m bergerak dengan kecepatan v . Jika tetapan Planck h , panjang gelombang partikel tersebut adalah

- $\frac{m}{hv}$
- $\frac{hv}{m}$
- $\frac{hm}{v}$
- mhv
- $\frac{h}{mv}$

27. Dalam tabung sinar-X, berkas elektron dipercepat oleh beda potensial $5 \times 10^4\ \text{V}$. Kemudian, dihentikan seketika oleh anode sehingga semua energi elektron menjadi gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang dalam daerah sinar-X. Jika tetapan Planck $6,62 \times 10^{-34}\ \text{Js}$, $c = 3 \times 10^8\ \text{m/s}$, dan muatan elektron $1,6 \times 10^{-19}\ \text{C}$, panjang gelombang sinar yang terjadi adalah

- $0,15\ \text{nm}$
- $0,125\ \text{nm}$
- $0,1\ \text{nm}$
- $0,05\ \text{nm}$
- $0,025\ \text{nm}$

28. Sebuah benda hitam memiliki suhu $2.000\ \text{K}$. Jika konstanta hukum pergeseran Wien $2,898 \times 10^{-3}\ \text{mK}$, rapat energi maksimum yang dipancarkan benda tersebut terletak pada panjang gelombang λ_{maks} sebesar

- $1,4\ \mu\text{m}$
- $2,9\ \mu\text{m}$
- $5,8\ \mu\text{m}$
- $7,3\ \mu\text{m}$
- $12,4\ \mu\text{m}$

29. Suatu berkas elektron ditambahkan pada gas hidrogen. Jika dihasilkan pemancaran spektrum yang berasal dari transisi $n = 3$ ke keadaan $n = 2$, sedangkan energi ikat elektron pada tingkat dasar sama dengan $13,6\ \text{eV}$, energi minimum elektron sama dengan

- $13,6\ \text{eV}$
- $12\ \text{eV}$

- $1,9\ \text{eV}$
- $0,14\ \text{eV}$
- $0,11\ \text{eV}$

30. Jika $^{230}_{90}\text{Th}$ memancarkan sinar α , nomor massa dan nomor atom yang dihasilkan adalah

Nomor Massa	Nomor Atom
a. 228	88
b. 224	90
c. 224	89
d. 226	86
e. 226	88

31. Gaya tarik listrik yang bekerja pada elektron hidrogen oleh proton (inti atom hidrogen) jika elektron mengelilingi proton pada jarak $0,53 \times 10^{-10}\ \text{m}$ (jari-jari Bohr) adalah

$$\left(\frac{1}{4}\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9\ \text{NC}^{-2}\text{m}^2, e = 1,6 \times 10^{-19}\ \text{C}\right)$$

- $-1,2 \times 10^{-84}\ \text{N}$
- $-3,7 \times 10^{-84}\ \text{N}$
- 0
- $-3,7 \times 10^{-8}\ \text{N}$
- $-8,2 \times 10^{-8}\ \text{N}$

32. Jika energi total elektron atom H di kulit M adalah $-E$, energi total elektron di kulit L adalah

- $-\frac{1}{9}E$
- $-\frac{1}{3}E$
- $-\frac{4}{9}E$
- $-\frac{2}{3}E$
- $-\frac{9}{4}E$

33. Sebuah roket, ketika diam di Bumi memiliki panjang $100\ \text{m}$. Roket tersebut bergerak dengan kecepatan $0,8\ c$ (c = kecepatan cahaya di dalam vakum). Menurut orang di Bumi, panjang roket tersebut adalah

- $50\ \text{m}$
- $60\ \text{m}$
- $70\ \text{m}$
- $80\ \text{m}$
- $100\ \text{m}$

34. Setiap detik, di Matahari terjadi perubahan $4 \times 10^9\ \text{kg}$ materi menjadi energi radiasi. Jika laju cahaya dalam vakum adalah $3 \times 10^{10}\ \text{cm/s}$, daya yang dipancarkan oleh Matahari adalah

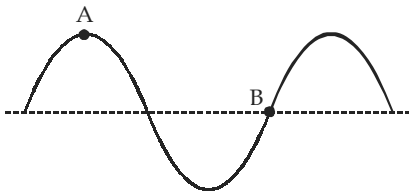
- $3,6 \times 10^{30}\ \text{watt}$
- $4,8 \times 10^{27}\ \text{watt}$



- c. $3,6 \times 10^{26}$ watt
d. $1,2 \times 10^{10}$ watt
e. 5×10^{10} watt
35. Satu gram massa berubah menjadi energi. Energi tersebut digunakan untuk mengangkat air setinggi 1 km. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, air yang dapat diangkat sebanyak
a. $3 \times 10^5 \text{ m}^3$
b. $9 \times 10^6 \text{ m}^3$
c. $3 \times 10^8 \text{ m}^3$
d. $9 \times 10^9 \text{ m}^3$
e. $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$
36. Jika laju partikel $0,6 c$ maka perbandingan massa relativistik partikel tersebut terhadap massa diamnya adalah
a. 5 : 3
b. 25 : 9
c. 5 : 4
d. 25 : 4
e. 8 : 5
37. Jika diketahui massa inti ${}^4_2\text{He} = 4,002 \text{ sma}$, massa proton = 1,0078 sma, massa neutron = 1,0087 sma, dan $1 \text{ sma} = 930 \text{ MeV}$, energi ikat inti ${}^4_2\text{He}$ adalah
a. 23 MeV
b. 23,44 MeV
c. 28,83 MeV
d. 43,44 MeV
e. 46,22 MeV
38. Urutan daya tembus sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling kuat adalah
a. alfa, beta, dan gamma
b. gamma, alfa, dan beta
c. beta, alfa, dan gamma
d. alfa, gamma, dan beta
e. gamma, beta, dan alfa
39. Suatu zat radioaktif meluruh dengan waktu paruh 20 hari. Supaya zat radioaktif hanya tinggal $\frac{1}{8}$ bagian dari jumlah asalnya, diperlukan waktu peluruhan selama
a. 27,5 hari
b. 30 hari
c. 40 hari
d. 60 hari
e. 160 hari
40. Proses sebuah inti atom berat terpecah menjadi dua atom yang lebih ringan, dikenal sebagai
a. fisi
b. fusi
c. reaksi berantai
d. reaksi siklis
e. peluruhan

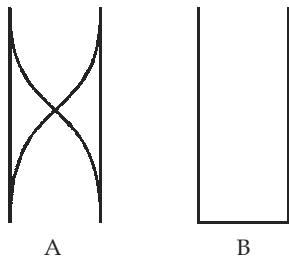
B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar dan kerjakanlah pada buku latihan Anda..

1. Perhatikan gambar berikut ini.



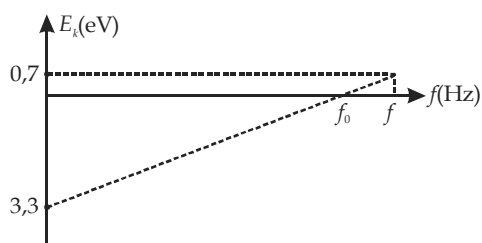
Gambar tersebut menggambarkan pola tali pada suatu saat yang dilewati gelombang berjalan dari kiri ke kanan. Jika pada saat itu titik A tepat telah bergetar sebanyak $8\frac{3}{4}$, tentukanlah banyaknya getaran yang terjadi pada titik B.

2. Perhatikan gambar berikut ini.



Jika panjang pipa organa terbuka A adalah 40 cm, tentukanlah panjang pipa organa B supaya frekuensi nada yang dihasilkan sama.

3. Diketahui sebuah persegi yang memiliki sisi 30 cm pada titik-titik sudutnya terdapat muatan listrik. Tentukanlah potensial listrik di titik pusat persegi jika dua muatan yang bertetangga masing-masing $+2 \mu\text{C}$ dan yang lain $-2 \mu\text{C}$.
4. Suatu solenoida yang panjangnya 2 meter dengan 800 lilitan dan memiliki jari-jari 2 cm, dialiri arus listrik sebesar 0,5 A. Tentukanlah induksi magnet pada ujung solenoida.
5. Diketahui suatu rangkaian seri RLC dengan besar $R = 100 \Omega$,
 $I = 2\sqrt{3} \sin(200t - \theta) \text{ A}$,
 $V = 400\sqrt{3} \sin(200t)$, dan
 $X_C = \sqrt{3} \times 10^2 \Omega$.
Tentukanlah reaktansi induktifnya.
6. Grafik grafik berikut menunjukkan hubungan antara energi kinetik maksimum elektron (E_k) terhadap frekuensi foton (f) pada efek foto listrik.



Jika konstanta Plank = $6,6 \times 10^{-34}$ Js, tentukanlah besar frekuensi ambangnya.

7. Suatu logam memiliki fungsi kerja sebesar 3,7 eV. Jika diketahui $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C dan $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js, tentukanlah frekuensi ambang logam tersebut.

8. Sebuah elektron yang memiliki massa diam m_0 bergerak dengan kecepatan $0,6 c$, tentukanlah energi kinetiknya.
9. Sebuah partikel bergerak dengan laju $v = \frac{1}{2} c \sqrt{3}$. Jika m_0 = massa diam, m = massa bergerak, E_k = energi kinetik, dan E_0 = energi diam, tentukanlah hubungan antara m dan m_0 , serta E_k dan E_0 .
10. Massa inti ${}^4_2\text{He}$ dan ${}^2_1\text{H}$ masing-masing adalah 4,002603 sma dan 2,014102 sma. Jika 1 sma = 931 MeV, tentukanlah energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel alfa menjadi dua deuteron.

Kunci Jawaban

Bab 1 Gelombang dan Sifat-Sifatnya

Soal Pramateri

2. Gelombang merupakan getaran yang merambat

Soal Penguasaan Materi 1.1

2. 4 s
4. 320 N

Soal Penguasaan Materi 1.2

2. Benda padat yang massa jenisnya lebih kecil

Soal Penguasaan Materi 1.3

2. 2 cm

Soal Penguasaan Materi 1.4

2. a. 0,44 m
b. 0,5 m

Soal Penguasaan Materi 1.5

2. 7,5 %

Evaluasi Materi Bab 1

A. Pilihan ganda

2. a. 12. d 22. a
4. d 14. b 24. a
6. a 16. e
8. c 18. a
10. d 20. e

B. Esai

2. 24 m
4. a. 0,8 kg/m
b. $5\sqrt{10}$ m/s
c. $\frac{7}{2}\sqrt{10}$ Hz
6. a. $\sqrt{2} \times 10^3$ m/s
b. $\frac{3}{2}\sqrt{2}$ m
8. a. 4 m
b. 8 Hz
c. $\frac{1}{4}$ m
d. 2 m/s
e. $2\sqrt{3}$ m
f. 2
10. a. $8 \sin \frac{\pi}{6}x$
b. 6 m

Bab 2 Gelombang Bunyi dan Cahaya

Soal Pramateri

2. Panjang gelombang adalah satu rapatan ditambah satu renggangan. Frekuensi gelombang adalah jumlah rapatan atau regangan yang melewati suatu titik tiap sekon. Cepat rambat gelombang adalah hasil kali panjang dan frekuensi gelombang.

Soal Penguasaan Materi 2.1

2. a. 20 cm
b. 30 m/s
c. 180 N
4. a. 5 m
b. 2,5 m
6. 3.600 m

Soal Penguasaan Materi 2.2

2. 643,2 nm
4. 2.000 nm

Evaluasi Materi Bab 2

A. Pilihan ganda

2. a. 12. c 22. b
4. e 14. d 24. e
6. c 16. c
8. c 18. c
10. b 20. d

B. Esai

2. a. 55 Hz
b. 3,6 m
4. a. 340 Hz
b. 1.020 Hz dan 1.700 Hz
6. 0,83 mm
8. 12 cm
10. a. 45°
b. 60°

Bab 3 Elektrostatika

Soal Pramateri

2. Tolak-menolak; tarik-menarik

Soal Penguasaan Materi 3.1

2. a. $-3,2 \times 10^{-7}$ C
b. $+1,6 \times 10^{-6}$ C
4. a. Ujung logam netral yang berdekatan dengan logam bermuatan positif menjadi bermuatan negatif.
b. Ujung logam netral yang berdekatan dengan logam bermuatan negatif menjadi bermuatan positif.

Soal Penguasaan Materi 3.2

2. a. 7,2 N
b. 1,8 N
c. Di tengah-tengah antara Q_1 dan Q_2
4. 0,87 N; 1,04 N; 0,87 N

Soal Penguasaan Materi 3.3

2. a. 0,6 Wb
b. 0,52 Wb
c. 0

Soal Penguasaan Materi 3.4

2. a. 1.800 J
b. 1.800 J
4. a. 0
b. $1,125 \times 10^5 \text{ N/C}$

Soal Penguasaan Materi 3.5

2. a. $177 \times 10^{-13} \text{ F}$
b. $2,124 \times 10^{-13} \text{ F}$
c. $12,744 \times 10^{-3} \text{ F}$
4. $2E$

Evaluasi Materi Bab 3

A. Pilihan ganda

2. a. 12. b 22. a
4. d 14. c 24. b
6. e 16. e
8. e 18. c
10. d 20. e

B. Esai

2. a. Positif; agar kuat medan di titik P oleh Q_2 berlawanan arah dengan kuat medan oleh Q_1 .
b. 64 C
4. a. Positif
b. $mg \tan \alpha$
c. $2 \times 10^7 \text{ V/m}$
6. a. $1,6 \times 10^{-16} \text{ N}$; ke atas
b. $1,8 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$
c. 0,53 cm
8. a. $36\sqrt{3} \times 10^9 \text{ V}$
b. $36\sqrt{3} \times 10^9 \text{ J}$
10. a. $0,75 \mu\text{F}$
b. $30 \mu\text{C}$; $40 \mu\text{C}$; $80 \mu\text{C}$
c. 200 V
d. $1,5 \times 10^{-2} \text{ J}$.

Bab 4 Induksi Magnet

Soal Pramateri

2. Mendekatkan besi pada magnet permanen, menggosok-gosokannya pada magnet permanen, dan dialiri arus listrik.

Soal Penguasaan Materi 4.1

2. a. $4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$; ke utara
b. $4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$; ke selatan
c. $4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$; ke bawah
d. $4,0 \times 10^{-5} \text{ T}$; ke atas
4. 800

Soal Penguasaan Materi 4.2

2. a. $3,75 \times 10^{-5} \text{ N/m}$
b. Arah kedua gaya saling mendekati

Soal Penguasaan Materi 4.3

2. 3 : 1

Soal Penguasaan Materi 4.4

2. a. Jumlah lilitan N , luas penampang kumparan A , besar medan magnet B , dan besar kuat arus listrik i .

- b. Memperbanyak jumlah lilitan memperbesar luas penampang kumparan, memperbesar medan magnet, atau memperbesar kuat arus listrik pada a sebesar dua kali dari semula.

Evaluasi Materi Bab 4

A. Pilihan ganda

2. c 12. b 22. a
4. d 14. b 24. d
6. b 16. a
8. e 18. c
10. c 20. b

B. Esai

2. 2,5 cm dari kawat 2 A atau 7,5 cm dari kawat 6 A.
4. $1,25 \times 10^{-3} \text{ T}$
6. a. 20
b. $1,25\pi \times 10^{-4} \text{ T}$
8. $1,33 \times 10^{-4} \text{ N/m}$
10. a. $8,4 \times 10^6 \text{ m/s}$
b. 2,4 mm.

Bab 5 Induksi Elektromagnetik dan Arus Listrik Bolak-Balik

Soal Pramateri

2. Keluar bidang kertas ($\bullet$)

Soal Penguasaan Materi 5.1

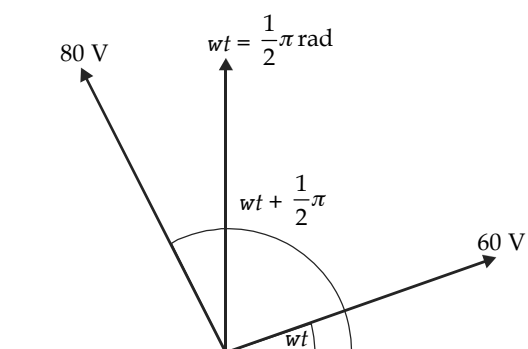
2. a. 2,5 V
b. 0,625 A
4. a. $3,6\pi \text{ V}$
b. Searah putaran jarum jam

Soal Penguasaan Materi 5.2

2. Memperbanyak jumlah lilitan N , memperbesar medan magnet B , memperbesar luas penampang kawat A , atau memperbesar kecepatan sudut rotor ω menjadi dua kali semula.
4. a. 50 W
b. 240 V
c. 2,1 A

Soal Penguasaan Materi 5.3

2. a.



- b. 90°
c. 100 V



Soal Penguasaan Materi 5.4

2. 1,6 mA

Soal Penguasaan Materi 5.5

2. a. 5 ohm
b. 4 A
4. a. $200\sqrt{2} \Omega$
b. $0,3\sqrt{2} A$
c. $60\sqrt{2} V$

Soal Penguasaan Materi 5.6

2. a. $\frac{5}{13}$
b. 50 W

Evaluasi Materi Bab 5

A. Pilihan ganda

2. a. 12. d 22. b
4. e 14. b 24. a
6. e 16. c
8. a 18. b
10. a 20. c

B. Esai

2. a. $\Phi = 10^{-5} \sin 2.000 t$
b. $\frac{d\Phi}{dt} = 2 \times 10^{-2} \cos 2.000 t$
c. $\varepsilon = -8 \cos 2.000 t$
d. $i = -0,4 \cos 2.000 t$
4. a. 0,53 mA
b. $2,14 \times 10^{-6} W$
6. a. $5 \times 10^{-6} H$
b. $5 \times 10^{-5} J$
8. $800\sqrt{2} V$

Evaluasi Materi Semester 1

A. Pilihan ganda

2. b 12. d 22. b
4. a 14. b 24. c
6. c 16. c
8. e 18. a
10. b 20. b

B. Esai

2. 4 s
4. a. 4.082 m/s
b. 2,04 m
6. a. 0,8 kg/m
b. $5\sqrt{10} m/s$
c. $\frac{10}{7} m$
d. $\frac{7}{2}\sqrt{10} Hz$
8. a. $2,5 \pi \times 10^2 W$
b. 250 m
10. a. 340 Hz
b. 1.020 Hz; 1.700 Hz

Bab 6 Teori Kuantum

Soal Pramateri

2. Dapat merambat di ruang hampa, dapat mengalami pembiasan, interferensi, difraksi, dan polarisasi.

Soal Penguasaan Materi 6.1

2. a. 5.000 K
b. $2,9 \times 10^{-7} m$

Soal Penguasaan Materi 6.2

2. a. 300 nm
b. 3,1 eV
c. 3,1 V
4. a. $8,0 \times 10^{14} Hz$
b. -3,3 J
c. $3,45 \times 10^{-18} J$; 21,5 V

Soal Penguasaan Materi 6.3

2. a. $2,43 \times 10^{-12} m$
b. 180°

Soal Penguasaan Materi 6.4

2. Setengah kali semula
4. $1,75 \times 10^{-10} m$

Evaluasi Materi Bab 6

A. Pilihan ganda

2. a 12. d 22. b
4. c 14. e 24. c
6. a 16. d
8. b 18. c
10. d 20. e

B. Esai

2. 1,07 mm
4. a. 1.000 K
b. 44 W
c. $1,33 \times 10^{21}$
6. a. $3,97 \times 10^{-19} J$
b. $6 \times 10^{14} Hz$
c. 7,01 eV
d. 7,01 V
8. a. 0,0024 nm
b. $4,7 \times 10^{-17} J$
c. $1,02 \times 10^7 m/s$
10. a. 3,87 Å
b. 1,22 Å
c. 0,387 Å

Bab 7 Teori dan Model-Model Atom

Soal Pramateri

2. Proton dan neutron terletak di dalam inti, sedangkan elektron bergerak mengelilingi inti pada lintasan tertentu.

Soal Penguasaan Materi 7.1

2. Sinar katode berbelok ketika dilewatkan pada medan magnet sehingga disimpulkan bahwa sinar tersebut bermuatan.

4. a. $-8 \times 10^{-19} \text{ C}$
b. $-2,5 \times 10^5 \text{ V/m}$
c. 10 kV

Soal Penguasaan Materi 7.2

2. a. 656 nm
b. 1.875 nm
c. 4.052 nm
d. 7.458 nm

Soal Penguasaan Materi 7.3

2. 12,1 eV
4. a. 12,1 eV; $1,026 \times 10^{-7} \text{ m}$
b. Deret Lyman

Evaluasi Materi Bab 7

A. Pilihan ganda

2. d 12. d 22. a
4. d 14. d 24. d
6. b 16. e
8. e 18. c
10. c 20. b

B. Esai

2. 9.116 Å
4. 3,4 eV
6. a. 2,55 eV
b. 4.862 Å

$$8. \Delta EK = E_{\text{foton}}$$

$$\frac{1}{2} m (u^2 - v^2) = hf$$

$$f = \frac{m (u^2 - v^2)}{2h}$$

$$\text{jadi, } \lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{2hc}{m (u^2 - v^2)}$$

10. 24,6 eV

Bab 8 Teori Relativitas Khusus

Soal Pramateri

2. Kerangka acuan adalah sistem koordinat yang dipakai untuk menentukan letak (dalam ruang dan waktu) gejala-gejala Fisika/alam.

Soal Penguasaan Materi 8.1

2. a. 12 tahun
b. 8 tahun
4. a. 1,2 m
b. 2,0 m
c. 2,0 m
6. a. $1,14 \times 10^{-30} \text{ kg}$
b. $2,05 \times 10^{-22} \text{ Ns}$

Soal Penguasaan Materi 8.2

2. 0,87 c

Evaluasi Materi Bab 8

A. Pilihan ganda

2. d 12. d 22. c
4. d 14. c 24. e
6. c 16. c
8. d 18. d
10. b 20. c

B. Esai

2. a. 0,5 c
b. 0,93 c
4. 40 %
6. 0,12 c
8. a. $2,78 \times 10^{-27} \text{ kg}$
b. $6,68 \times 10^{-19} \text{ kg m/s}$
c. $9,99 \times 10^{-11} \text{ J}$
10. a. 0,94 c
b. $2,42 \times 10^{-13} \text{ J}$

Bab 9 Fisika Inti dan Radioaktivitas

Soal Pramateri

2. Unsur-unsur tidak stabil sehingga akan memancarkan partikel-partikel radioaktif, seperti α , β , dan γ .

Soal Penguasaan Materi 9.1

2. ${}_3\text{Li}^7$
4. a. $5,49 \times 10^{-4} \text{ sma}$
b. 0,51 MeV

Soal Penguasaan Materi 9.2

2. Sinar γ , karena sinar γ merupakan gelombang elektromagnetik yang tidak bermassa dan tidak bermuatan.
4. a. 25 %
b. 12,5 %
c. 6,25 %
6. 22.400 tahun

Evaluasi Materi Bab 9

A. Pilihan ganda

2. a 12. d 22. d
4. d 14. b 24. c
6. b 16. b
8. c 18. d
10. b 20. d

B. Esai

2. a. 8 ; 8 ; 8
b. 27 ; 33 ; 27
c. 56 ; 82 ; 56
d. 84 ; 126 ; 84
4. a. 0,112356 sma
b. 104,7 MeV
6. a. 8 jam
b. 0,087/jam
c. 0,0024 %
8. a. ${}_{8}^{20}\text{O}$
b. ${}_0^1n$
c. ${}_0^1n$
10. 28,3 MeV



Evaluasi Materi Semester 2

A. Pilihan ganda

2. b

4. d

6. c

8. c
10. b

12. d

14. b

16. e
18. c

20. c

22. d

24. c

B. Esai

2. a. 300 m/s

b. 75 Hz

c. 2 m
4. 0,53 N pada $2\text{ }\mu\text{C}$ dan 0,87 N pada $-3\text{ }\mu\text{C}$
6. a. Berlawanan arah putaran jarum jam
8. 12 Hz
10. 28,3 MeV

10. e

12. d

14. c

16. d

18. d

20. e

22. e

24. b
26. e

28. a

30. e

32. e

34. c

36. c

38. e

40. a

B. Esai

2. 60 cm
4. $8\pi\times10^{-5}\text{ Wb/m}^2$
6. $8\times10^{16}\text{ Hz}$
8. $0,25\text{ m}_0c^2$
10. 24 MeV

Evaluasi Materi Akhir Tahun

A. Pilihan ganda

2. c

4. a
6. d

8. d

Sistem Satuan, Konversi, Konstanta, Matematis, dan Hadiah Nobel

Tabel Satuan Internasional (SI)			
Kuantitas	Nama	Simbol	Definisi
Panjang	meter	m	"... panjang yang sama dengan 1.650.763,73 panjang gelombang dalam vakum dari radiasi yang bersesuaian dengan transisi di antara tingkat 2p ₁₀ dan tingkat 5d ₅ dari atom krypton-86." (1960)
Massa	kilogram	kg	"... prototip ini (sebuah silinder platinum-iridium tertentu). Dengan demikian akan dianggap satuan massa." (1889)
Waktu	sekon	s	"... lamanya 9.192.631.770 periode radiasi yang bersesuaian dengan transisi di antara kedua tingkat hiperhalus dari keadaan dasar atom cesium-133." (1967)
Arus listrik	ampere	A	"... bahwa jika arus konstan dipertahankan dalam dua penghantar sejajar yang lurus dan panjangnya tak berhingga, penampang lingkarannya dapat diabaikan, serta ditempatkan terpisah sejauh 1 m satu sama lain dalam vakum, akan menghasilkan sebuah gaya di antara penghantar-penghantar ini yang besarnya sama dengan 2 × 10 ⁻⁷ newton per meter panjang." (1946)
Temperatur termodinamika	kelvin	K	"... pecahan 1/273,16 dari temperatur termodinamika titik tripel air." (1967)
Banyaknya zat	mol	mol	"... banyaknya zat sebuah sistem yang mengandung sejumlah entitas elementer sebanyak atom yang ada dalam 0,012 kilogram karbon-12." (1971)
Intensitas cahaya	kandela	cd	"... intensitas cahaya dalam arah tegak lurus dari sebuah permukaan benda hitam seluas 1/600.000 meter kuadrat pada temperatur platinum beku di bawah tekanan sebesar 101.325 newton per meter kuadrat." (1967)

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Massa							
	g	kg	slug	u	oz	lg	ton
1 gram =	1	0,001	6,852 × 10 ⁻⁵	6,024 × 10 ²³	3,527 × 10 ⁻²	2,205 × 10 ⁻³	1,102 × 10 ⁻⁶
1 kilogram =	1000	1	6,852 × 10 ⁻²	6,024 × 10 ²⁶	35,27	2,205	1,102 × 10 ⁻³
1 slug =	1,459 × 10 ⁴	14,59	1	8,789 × 10 ²⁷	514,8	32,17	1,609 × 10 ⁻²
1 u =	1,660 × 10 ⁻²⁴	1,660 × 10 ⁻²⁷	1,137 × 10 ⁻²⁸	1	5,855 × 10 ⁻²⁶	3,660 × 10 ⁻²⁷	1,829 × 10 ⁻³⁰
1 ons =	28,35	2,835 × 10 ⁻²	1,943 × 10 ⁻³	1,708 × 10 ²⁵	1	6,250 × 10 ⁻²	3,125 × 10 ⁻⁵
1 pon =	453,6	0,4536	3,108 × 10 ⁻²	2,732 × 10 ²⁶	16	1	0,0005
1 ton =	9,072 × 10 ⁵	907,2	62,16	5,465 × 10 ²⁹	3,2 × 10 ⁴	2000	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Laju						
	ft/s	km/h	meter/sekon	mi/h	cm/s	knot
1 kaki per sekon =	1	1,097	0,3048	0,6818	30,48	0,5925
1 kilometer per jam =	0,9113	1	0,2778	0,6214	27,78	0,5400
1 meter per sekon=	3,281	3,6	1	2,237	100	1,944
1 mile =	1,467	1,609	0,4470	1	44,70	0,8689
1 centimeter per sekon =	3,281 × 10 ⁻²	3,6 × 10 ⁻²	0,01	2,237 × 10 ⁻²	1	1,944 × 10 ⁻²
1 knot =	1,688	1,852	0,5144	1,151	51,44	1

Sumber: Fisika, 1996



Tabel Beberapa Konstanta Fisika yang Fundamental

Konstanta	Simbol	Nilai Komputasi	Nilai (1973) terbaik	
			Nilai	Ketidaktentuan
Laju cahaya dalam vakum	c	$3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$	2,99792458	0,004
Muatan elementer	e	$1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$	1,6021892	2,9
Massa diam elektron	m_e	$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$	9,109534	5,1
Konstanta permitivitas	ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	8,854187818	0,008
Konstanta permeabilitas	μ_0	$1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$	4π (exactly)	—
Perbandingan muatan dan massa elektron	e/m_e	$1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$	1,7588047	2,8
Massa diam proton	m_p	$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1,6726485	5,1
Perbandingan massa proton dan massa elektron	m_p/m_e	1840	1836,15152	0,38
Massa diam neutron	m_n	$1,68 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1,6749543	5,1
Massa diam muon	m_μ	$1,88 \times 10^{-28} \text{ kg}$	1,883566	5,6
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$	6,626176	5,4
Panjang gelombang Compton elektron	λ_c	$2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$	2,4263089	1,6
Konstanta gas molar	R	8,31 J/molK	8,31441	31
Bilangan Avogadro	N_A	$6,02 \times 10^{23} / \text{mol}$	6,022045	5,1
Konstanta Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	1,380662	32
Volume molar gas ideal pada STP	V_m	$2,24 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{mol}$	2,241383	31
Konstanta Faraday	F	$9,65 \times 10^4 \text{ C/mol}$	9,648456	2,8
Konstanta Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	5,67032	125
Konstanta Rydberg	R	$1,10 \times 10^7 / \text{m}$	1,097373177	0,075
Konstanta gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2\text{kg}$	6,6720	615
Jari-jari Bohr	a_0	$5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$	5,2917706	0,82
Momen magnet elektron	μ_e	$9,28 \times 10^{-24} \text{ J/T}$	9,284832	3,9
Momen magnet proton	μ_p	$1,41 \times 10^{-26} \text{ J/T}$	1,4106171	3,9
Magneton Bohr	μ_B	$9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$	9,274078	3,9
Magneton nuklir	μ_N	$5,05 \times 10^{-27} \text{ J/T}$	5,050824	3,9

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Sudut Bidang

	°	'	"	Radian	Putaran
1 derajat =	1	60	3.600	$1,745 \times 10^{-2}$	$2,778 \times 10^{-3}$
1 menit =	$1,667 \times 10^{-2}$	1	60	$2,909 \times 10^{-4}$	$4,630 \times 10^{-5}$
1 sekon =	$2,778 \times 10^{-4}$	$1,667 \times 10^{-2}$	1	$4,848 \times 10^{-6}$	$7,716 \times 10^{-7}$
1 radian =	57,30	3.438	$2,063 \times 10^5$	1	0,1592
1 putaran =	360	$2,16 \times 10^4$	$1,296 \times 10^6$	6,283	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Panjang

	cm	meter	km	in.	ft
1 centimeter =	1	10^{-2}	10^{-5}	0,3937	$3,281 \times 10^{-2}$
1 meter =	100	1	10^{-3}	39,3	3,281
1 kilometer =	105	1.000	1	$3,937 \times 10^4$	3.281
1 inci =	2,540	$2,540 \times 10^{-2}$	$2,540 \times 10^{-5}$	1	$8,333 \times 10^{-2}$
1 kaki =	30,48	0,3048	$3,048 \times 10^{-4}$	12	1
1 mil =	$1,609 \times 10^5$	1.609	1,609	$6,336 \times 10^4$	5.280

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Tekanan				
	atm	dyne/cm ²	cm-Hg	PASCAL
1 atmosphere =	1	1,013 × 10 ⁶	76	1,013 × 10 ⁵
1 dyne per cm ² =	9,869 × 10 ⁻⁷	1	7,501 × 10 ⁻⁴	0,1
1 inci air pada 0°C =	2,458 × 10 ⁻³	2491	0,1868	249,1
1 centimeter of mercury at 0°C =	1,316 × 10 ⁻²	1,333 × 10 ⁴	1	1.333
1 pascal =	9,869 × 10 ⁻⁶	10	7,501 × 10 ⁻⁴	1
1 pon per inci ² =	6,805 × 10 ⁻²	6,895 × 10 ⁴	5,171	6,895 × 10 ³
1 pon per fit ² =	4,725 × 10 ⁻⁴	478,8	3,591 × 10 ⁻²	47,88

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Tenaga, Kerja, dan Kalor						
	joule	cal	kWh	eV	MeV	kg
1 satuan kalor Inggris =	1055	252,0	2,930 × 10 ⁻⁴	6,585 × 10 ²¹	6,585 × 10 ¹⁵	1,174 × 10 ⁻¹⁴
1 erg =	10 ⁻⁷	2,389 × 10 ⁻⁸	2,778 × 10 ⁻¹⁴	6,242 × 10 ¹¹	6,242 × 10 ⁵	1,113 × 10 ⁻²⁴
1 kaki-pon =	1,356	0,3239	3,766 × 10 ⁻⁷	8,464 × 10 ¹⁸	8,464 × 10 ¹²	1,509 × 10 ⁻¹⁷
1 daya kuda-jam =	2,685 × 10 ⁴	6,414 × 10 ⁵	0,7457	1,676 × 10 ²⁵	1,676 × 10 ¹⁹	2,988 × 10 ⁻¹¹
1 joule =	1	0,2389	2,778 × 10 ⁻⁷	6,242 × 10 ¹⁸	6,242 × 10 ¹²	1,113 × 10 ⁻¹⁷
1 kalori =	4,186	1	1,163 × 10 ⁻⁶	2,613 × 10 ¹⁹	2,613 × 10 ¹³	4,659 × 10 ⁻¹⁷
1 kilowatt-jam =	3,6 × 10 ⁸	8,601 × 10 ⁵	1	2,247 × 10 ²⁵	2,247 × 10 ¹⁹	4,007 × 10 ⁻¹¹
1 elektron volt =	1,602 ×10 ⁻¹⁹	3,827 × 10 ⁻²⁰	4,450 × 10 ⁻²⁶	1	10 ⁻⁶	1,783 × 10 ⁻³⁶
1 juta elektron volt =	1,602 ×10 ⁻¹³	3,827 × 10 ⁻¹⁴	4,450 × 10 ⁻²⁰	10 ⁶	1	1,783 × 10 ⁻³⁰
1 kilogram =	8,987 × 10 ¹⁶	2,147 × 10 ¹⁶	2,497 × 10 ¹⁰	5,610 × 10 ³⁵	5,610 × 10 ²⁹	1
1 satuan massa atom terpadu =	1,492 × 10 ⁻¹⁰	3,564 × 10 ⁻¹¹	4,145 × 10 ⁻¹⁷	9,31 × 10 ⁸	931,0	1,660 × 10 ⁻²⁷

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Daya						
	Btu/h	ftlb/s	hp	cal/s	kW	watt
1 satuan kalor Inggris per jam =	1	0,2161	3,929 × 10 ⁻⁴	7,000 × 10 ⁻²	2,930 × 10 ⁻⁴	0,2930
1 kaki-pon per sekon =	4,628	1	1,818 × 10 ⁻³	0,3239	1,356 × 10 ⁻³	1,356
1 daya kuda =	2545	550	1	178,2	0,7457	745,7
1 kalor per sekon =	14,29	3,087	5,613 × 10 ⁻³	1	4,186 × 10 ⁻³	4,186
1 kilowatt =	3.413	737,6	1,341	238,9	1	1000
1 watt =	3,413	0,7376	1,341 × 10 ⁻³	0,2389	0,001	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Muatan				
	abcoul	Ah	coulomb	statcoul
1 abcoulomb =	1	2,778 × 10 ⁻³	10	2,998 × 10 ¹⁰
1 ampere-hour =	360	1	3.600	1,079 × 10 ¹³
1 coulomb =	0,1	2,778 × 10 ⁻⁴	1	2,998 × 10 ⁹
1 statcoulomb =	3,336 × 10 ⁻¹¹	9,266 × 10 ⁻¹⁴	3,336 × 10 ⁻¹⁰	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Fluks Magnet		
	maxwell	weber
1 maxwell =	1	10 ⁻⁸
1 weber =	10 ⁸	1

Sumber: Fisika, 1996

Tabel Medan Magnet			
	gauss	tesla	milligauss
1 gauss =	1	10 ⁻⁴	1000
1 tesla =	10 ⁴	1	10 ⁷
1 milligauss =	0,001	10 ⁻⁷	1

Sumber: Fisika, 1996



Tanda dan Simbol Matematika

=	menyamai
≈	kira-kira menyamai
≠	tidak sama dengan
≡	identik dengan, didefinisikan sebagai
>	lebih besar daripada ($\gg$ jauh lebih besar daripada)
<	lebih kecil daripada ($\ll$ jauh lebih kecil daripada)
$\geq$	lebih daripada atau sama dengan (atau, tidak kurang daripada)
$\leq$	kurang daripada atau sama dengan (atau, tidak lebih daripada)
+	tambah atau kurang ($\sqrt{4} = \pm 2$)
~	sebanding dengan (hukum Hooke: $F \sim x$, atau $F = -kx$)
$\sum$	jumlah dari
$\bar{x}$	nilai x rata-rata

Alfabet Yunani

Alpha	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Υ	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ, φ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

Geometri

Lingkaran yang jari-jarinya r : keliling = $2\pi r$
luas = πr^2

Bola yang jari-jarinya r : luas = $4\pi r^2$

$$\text{volume} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Silinder lingkaran tegak yang jari-jarinya r dan tingginya h : luas = $2\pi r^2 + 2\pi rh$
volume = $\pi r^2 h$

Identitas Trigonometri

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\sec^2 \theta - \tan^2 \theta = 1$$

$$\csc^2 \theta - \cot^2 \theta = 1$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}$$

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2i}$$

$$e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan \alpha \pm \tan \beta}{1 \pm \tan \alpha \tan \beta}$$

$$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha \pm \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha \mp \beta)$$

Turunan dan Integral tidak tentu

1. $\frac{dx}{dx} = 1$
2. $\frac{d}{dx}(au) = a \frac{du}{dx}$
3. $\frac{d}{dx}(u+v) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx}$
4. $\frac{d}{dx}x^m = mx^{m-1}$
5. $\frac{d}{dx} \ln x = \frac{1}{x}$
6. $\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$
7. $\frac{d}{dx}e^x = e^x$
8. $\frac{d}{dx} \sin x = \cos x$
9. $\frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$
1. $\int dx = x$
2. $\int au \, dx = a \int u \, dx$
3. $\int (u+v) \, dx = \int u \, dx + \int v \, dx$
4. $\int x^m \, dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} \quad (m \neq -1)$
5. $\int \frac{dx}{x} = \ln|x|$
6. $\int u \frac{dv}{dx} \, dx = uv - \int v \frac{du}{dx} \, dx$
7. $\int e^x \, dx = e^x$
8. $\int \sin x \, dx = -\cos x$
9. $\int \cos x \, dx = \sin x$

Perkalian Vektor

Misalkan $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ adalah vektor-vektor satuan dalam arah-arah x, y, z maka

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1, \quad \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0,$$

$$\mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0,$$

$$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}, \quad \mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}, \quad \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}.$$

Setiap vektor $\mathbf{a}$ dengan komponen-komponen a_x, a_y, a_z sepanjang sumbu-sumbu x, y, z dapat dituliskan

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$$

Misalkan $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ adalah vektor-vektor sebarang yang besarnya a, b, c maka

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$$

$$(\mathbf{sa}) \times \mathbf{b} = \mathbf{a} \times (\mathbf{sb}) = s(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \quad (s = \text{sebuah skalar})$$

Misalkan θ adalah yang lebih kecil dari kedua sudut di antara $\mathbf{a}$ dan $\mathbf{b}$ maka

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = ab \cos \theta$$

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - b_y a_z) \mathbf{i} + (a_z b_x - b_z a_x) \mathbf{j} + (a_x b_y - b_x a_y) \mathbf{k}$$

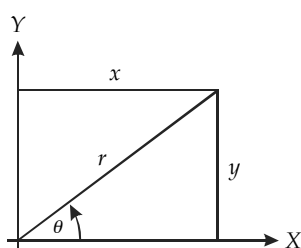
$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = ab \sin \theta$$

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) \mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \mathbf{c}$$

Teorema Pythagoras

$$x^2 + y^2 = r^2$$



Hadiah Nobel dalam Fisika

1901	Wilhelm Conrad Röntgen	1845–1923	untuk penemuan sinar yang mengagumkan yang selanjutnya dinamai sinar Röntgen
1902	Hendrik Antoon Lorentz Pieter Zeeman	1853–1928 1865–1943	untuk penelitian mereka ke dalam pengaruh magnetisma pada fenomena radiasi
1903	Antoine Henri Becquerel	1852–1908	untuk penemuannya mengenai radiasi dioaktivitas spontan
	Pierre Curie Marie Skłodowska-Curie	1859–1906 1867–1934	untuk penelitian bersama mengenai fenomena radiasi yang ditemukan oleh Profesor Henri Becquerel
1904	Lord Rayleigh (John William Strutt)	1842–1919	untuk penyelidikannya mengenai kerapatan gas-gas yang paling penting dan untuk penemuan gas argon
1905	Philipp Eduard Anton	1862–1947	untuk karyanya mengenai sinar katoda
1906	Joseph John Thomson	1856–1940	untuk penyelidikan teoretis dan eksperimentalnya mengenai hantaran listrik oleh gas
1907	Albert Abraham Michelson	1852–1931	untuk alat presisi optiknya dan penyelidikan metrologis yang dilakukan dengan menggunakan alat tersebut
1910	Johannes Diderik van der Waals	1837–1923	untuk karyanya mengenai persamaan keadaan untuk gas dan cairan
1911	Wilhelm Wien	1864–1928	untuk penemuannya mengenai hukum yang mengatur radiasi kalor
1915	William Henry Bragg William Lawrence Bragg	1862–1942 1890–1971	untuk pelayanan mereka dalam analisis struktur kristal dengan menggunakan sinar Röntgen
1917	Charles Glover Barkla	1877–1944	untuk penemuannya mengenai karakteristik radiasi sinar Röntgen dari elemen-elemen
1918	Max Planck	1858–1947	untuk penemuan kuantum tenaga
1921	Albert Einstein	1879–1955	untuk pelayanannya dalam Fisika Teoretik, dan khususnya untuk penemuannya mengenai hukum efek fotolistrik
1922	Niels Bohr	1855–1962	untuk penyelidikan struktur atom, dan radiasi yang memancar keluar dari atom tersebut
1923	Robert Andrews Millikan	1868–1983	untuk karyanya mengenai muatan listrik elementer dan mengenai efek fotolistrik
1925	James Franck Gustav Hertz	1882–1964 1887–1975	untuk penemuan mereka mengenai hukum yang mengatur tumbukan sebuah elektron pada sebuah atom
1927	Arthur Holly Compton	1892–1962	untuk penemuannya mengenai efek yang dinamakan seperti namanya
1929	Prince Louis Victor de Broglie	1892–1987	untuk penemuannya mengenai sifat gelombang elektron
1932	Werner Heisenberg	1901–1976	untuk terciptanya mekanika kuantum, yang pemakaiannya antara lain, menghasilkan penemuan bentuk alotropik dari hidrogen
1933	Erwin Schrodinger Paul Adrien Maurice Dirac	1887–1961 1902–1984	untuk penemuan bentuk baru yang produktif dari teori atom.
1936	Victor Franz Hess	1883–1964	untuk penemuan radiasi kosmis
1938	Enrico Fermi	1901–1954	untuk demonstrasi adanya elemen radioaktif baru yang dihasilkan oleh penyinaran neutron, dan untuk penemuan reaksi nuklir yang dihubungkan dengan hal tersebut yang dihasilkan oleh neutron lambat
1945	Wolfgang Pauli	1900–1958	untuk penemuan Prinsip Larangan yang juga dinamakan Prinsip Pauli
1954	Max Born	1882–1970	untuk penelitian dasar dalam mekanika kuantum, khususnya untuk interpretasi statistik dari fungsi gelombang

Kamus Fisika

A

Alfa: partikel yang dipancarkan saat peluruhan, yang menyebabkan nomor massa inti induk berkurang empat dan nomor atomnya berkurang dua. Partikel alfa ini sering pula dilambangkan dengan α

Amplitudo: simpangan terbesar pada suatu getaran, dihitung dari titik kesetimbangan

Angstrom: satuan panjang yang biasa digunakan untuk menyatakan panjang gelombang cahaya

Anode: kutub atau ujung positif pada tabung sinar katode

Atom: bagian penyusun materi. Atom masih dapat dibagi lagi menjadi partikel-partikel yang lebih elementer

Audiosonik: gelombang bunyi yang frekuensinya dari 20 Hz sampai dengan 20 khz

B

Becquerel: Satuan dari aktivitas radioaktif yang setara dengan peluruhan per sekon

Benda hitam: sistem atau benda yang menyerap dan memancarkan kalor secara sempurna kalor yang diterimanya

Benda hitam sempurna: benda yang dapat menyerap semua radiasi yang diterimanya

Berkas gelombang: garis yang digambarkan searah gerak gelombang dan tegak lurus gelombang

Bilangan kuantum: bilangan yang digunakan untuk menyatakan keadaan elektron pada atom berelektron banyak

Bunyi: salah satu contoh gelombang longitudinal yang merambat pada frekuensi dan intensitas yang dapat didengar oleh manusia

C

Cahaya: salah satu bentuk energi yang dipancarkan oleh benda (sumber cahaya) dalam bentuk gelombang elektromagnetik

Celah ganda: dua celah tembus cahaya yang jaraknya sangat dekat satu sama lain. Celah ganda dibuat pada sepotong lempeng tidak tembus cahaya, digunakan untuk menimbulkan interferensi cahaya

Cepat rambat gelombang: Jarak yang ditempuh gelombang dalam satu sekon

D

Defek massa: selisih antara jumlah massa partikel-partikel pembentuk sebuah inti atom dan masa sebuah inti atom yang terbentuk. Defek massa ini bertanggung jawab terhadap adanya energi ikat partikel-partikel penyusun inti

Difraksi: pembelokan gelombang, misalnya gelombang cahaya, apabila melewati tepi sebuah penghalang

Deret radioaktif: urutan peluruhan yang dialami suatu inti induk hingga menjadi inti anak

E

Efek Doppler: peristiwa berubahnya frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar karena adanya perubahan jarak (gerak relatif antara sumber bunyi dan pendengar)

Efek fotolistrik: gejala terlepasnya elektron dari permukaan logam ketika disinari cahaya atau gelombang elektromagnetik lain

Elektromagnetik: gelombang yang tidak membutuhkan medium untuk merambat dan diakibatkan oleh gejala kelistrikan dan kemagnetan. Efek rumah kaca. Gejala yang ditimbulkan oleh lapisan gas karbon dioksida pada atmosfer bumi, yang menimbulkan pemantulan kembali radiasi kalor yang dipancarkan oleh bumi. Efek rumah kaca ini menyebabkan terjadinya pemanasan global

Elektrodinamika: cabang ilmu Fisika yang berkaitan dengan muatan listrik yang bergerak

Elektrostatika: cabang ilmu Fisika yang berkaitan dengan muatan listrik yang bergerak elektromagnetik

Emisivitas: kemampuan meradiasikan energi dalam bentuk gelombang

Energi ionisasi: energi yang diperlukan suatu atom untuk melepaskan elektron terluarnya

F

Fase: pada getaran atau gerak periodik, fase didefinisikan sebagai hasil bagi waktu t (lamanya gerak periodik dihitung pada suatu saat tertentu), dengan periode T gerak periodik itu

Fasor: sebuah vektor (anak panah) yang berputar secara periodik dengan melambangkan besaran yang berubah secara periodik dan sinusoidal

Fisi: reaksi pembelahan inti atom berat menjadi inti-inti atom ringan

Fluks: ukuran kuatnya medan gaya yang melalui suatu permukaan, seperti pada fluks magnetik dan fluks listrik

Frekuensi: banyaknya gelombang atau getaran pada suatu peristiwa periodik (peristiwa yang berulang-ulang secara teratur setiap sekon)

Frekuensi gelombang: jumlah gelombang yang melewati suatu titik

Foton: disebut juga kuantum, paket-paket energi yang terkuantitasi

Fotoelektron: elektron yang lepas dari logam akibat efek fotolistrik

Fusi: reaksi penggabungan inti-inti atom ringan menjadi inti atom yang lebih berat. Reaksi fusi ini merupakan sumber energi bagi matahari dan bintang-bintang

G

- Galvanometer:** alat untuk menunjukkan adanya kuat arus yang kecil atau untuk mengukur kuat arus yang kecil
- Garputala:** alat untuk menimbulkan nada yang murni (getarannya harmonik). Biasanya terbuat dari baja dengan dua batang membentuk huruf U
- Gaya Gerak Listrik:** disebut pula gaya elektromotorik. Beda potensial antara kutub-kutub sumber arus pada saat sumber arus tidak mengalirkan arus listrik
- Gaya inti:** disebut juga gaya nuklir, gaya yang menyebabkan proton dan neutron tetap berada pada inti
- Gelombang:** proses merambatnya suatu getaran yang tidak disertai dengan perpindahan, medium perantaranya, tetapi hanya memindahkan energi
- Gelombang elektromagnetik:** gelombang yang perambatannya tidak membutuhkan medium, contohnya gelombang radio dan gelombang televisi
- Gelombang kejut:** fenomena pada gelombang bunyi yang terjadi ketika kecepatan sumber bunyi lebih besar daripada kecepatan bunyi
- Gelombang longitudinal:** gelombang yang partikel-partikel medium yang dilaluinya bergetar dalam arah yang sejajar dengan arah rambatnya, contohnya gelombang bunyi dan gelombang pada slinki
- Gelombang mekanik:** Gelombang yang perambatannya memerlukan medium
- Gelombang transversal:** gelombang yang partikel-partikel medium bergetar naik turun dalam arah tegak lurus terhadap arah gelombang itu sendiri, contohnya gelombang pada tali dan gelombang cahaya
- Gelombang berjalan:** gelombang yang bergerak dengan amplitudo tetap
- Gelombang stasioner:** gelombang yang amplitudonya berubah terhadap posisi
- Guci Leyden:** alat pertama yang digunakan oleh ilmuwan untuk menyimpan muatan listrik yang mereka buat

I

- Impedansi:** dalam listrik, gabungan perlawanan terhadap arus bolak-balik, baik yang disebabkan oleh hambatan, maupun oleh adanya kapasitor dan induktor yang terdapat di dalam rangkaian tempat arus bolak-balik itu mengalir
- Indeks bias:** suatu bilangan yang menyatakan perbandingan antara proyeksi sinar datang dan proyeksi sinar bias, apabila sinar datang diambil sama panjangnya dengan sinar bias
- Induktansi:** sifat sebuah rangkaian listrik atau komponen yang menyebabkan timbulnya GGL di dalam rangkaian sebagai akibat perubahan arus yang melewati rangkaian (induktansi diri) atau akibat perubahan arus yang melewati rangkaian tetangga yang dihubungkan secara magnetis (induktansi silang)

Induksi elektromagnetik: peristiwa timbulnya GGL di dalam suatu rangkaian listrik karena fluks magnetik yang melalui rangkaian itu berubah

Intensitas: energi yang dipindahkan tiap satuan waktu atau daya yang dipancarkan tiap satuan luas

Intensitas bunyi: fluks bunyi yang mengalir melalui satu satuan luas permukaan tegak lurus arah perambatan bunyi

Interferensi: perpaduan atau superposisi gelombang ketika dua gelombang atau lebih tiba di tempat yang sama pada saat yang sama. Interferensi maksimum terjadi jika dua gelombang bertemu memiliki fase yang sama, sedangkan interferensi minimum terjadi jika dua gelombang yang bertemu memiliki fase yang berlawanan

Interferensi cahaya: perpaduan antara dua gelombang cahaya yang koheren, yakni memiliki amplitudo dan panjang gelombang yang sama, serta beda fase tetap

Interferensi destruktif: interferensi minimum atau interferensi dua gelombang yang amplitudonya saling melemahkan dan terjadi jika dua gelombang memiliki fase yang berlawanan

Interferensi konstruktif: interferensi maksimum atau interferensi dua gelombang yang amplitudonya saling menguatkan dan terjadi jika dua gelombang memiliki fase yang sama

Inframerah: spektrum gelombang cahaya yang memiliki panjang gelombang besar

Infrasonik: gelombang bunyi yang frekuensinya kurang dari 20 Hz

Intensitas ambang: intensitas bunyi minimum yang masih dapat didengar oleh manusia, yakni 10^{-12} W/m^2

K

Kapasitas kapasitor: besaran yang menyatakan kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan atau energi

Kisi: sejumlah celah sempit sejajar dan terpisah dengan jarak yang sama

Koheren: keadaan dua gelombang yang memiliki amplitudo, panjang gelombang, atau frekuensi yang sama

Kondensator: disebut juga kapasitor. Dua penghantar yang dipisahkan oleh suatu isolator, dibuat sedemikian sehingga memiliki kapasitas (listrik) tertentu

Kuat medan listrik: gaya yang dialami oleh satu satuan muatan yang ditempatkan di suatu titik dalam medan listrik

Kumparan: lilitan kawat penghantar dalam bentuk silinder atau bentuk lain

L

Layangan: interferensi dua gelombang bunyi yang perbedaan frekuensinya kecil (di bawah 20 Hz)

M

Magnet: logam atau bahan lain yang memiliki sifat dapat menarik besi, nikel, dan kobalt

Magnet tetap: magnet permanen atau bahan yang mampu menyimpan sifat magnet secara permanen

Magnet sementara: bahan yang menyimpan sementara sifat magnet

Massa defek: selisih antara massa nukleon dan massa inti

Medan listrik: ruang di sekitar muatan listrik tempat muatan lain mengalami gaya listrik

Medan magnet: ruang di sekitar magnet yang dihasilkan oleh arus listrik

Medan magnet induksi: medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik

Modulus Bulk: perbandingan antara perubahan tekanan dan fraksi perubahan volume suatu zat cair atau gas

Muka gelombang: lebar puncak gelombang

N

Nada: bunyi yang memiliki frekuensi tertentu

P

Panjang gelombang: panjang satu puncak dan satu lembah pada gelombang transversal atau panjang satu rapatan dan satu renggangan pada gelombang longitudinal

Pelayanan bunyi: fenomena interferensi pada dua gelombang bunyi yang frekuensinya hampir sama (perbedaannya kecil)

Periode Gelombang: waktu yang diperlukan untuk menempuh satu panjang gelombang

Permitivitas: perbandingan antara perpindahan listrik dan kuat medan listrik pada titik yang sama

Polarisasi: peristiwa terserapnya sebagian atau seluruh arah getar gelombang

Potensial henti: beda potensial yang menyebabkan terhentinya arus fotolistrik

R

Radiasi benda hitam: radiasi yang dihasilkan benda hitam sempurna

Radioaktivitas: peristiwa pemancaran partikel-partikel radioaktif secara spontan

Regangan (strain): ukuran sampai sejauh mana sebuah benda mengalami deformasi jika diberi tegangan

Resonansi: getaran yang terjadi pada suatu benda karena bekerjanya gaya periodik yang frekuensinya sama atau hampir sama dengan frekuensi alamiah benda itu

Refleksi: pemantulan gelombang

Refraksi: Pembiasan gelombang atau pembelokan arah muka gelombang ketika masuk dari satu medium ke medium lainnya

S

Simpangan: jarak titik yang bergetar pada suatu saat ke titik kesetimbangannya

Simpangan gelombang: jarak partikel yang dilalui gelombang ke titik setimbang

Sonic boom: dentuman suara yang memiliki energi cukup besar yang terjadi ketika gelombang kejut yang dihasilkan sumber bunyi melewati pengamat

Solenoida: kumparan kawat yang terdiri atas banyak lilitan

Sudut Brewster : sudut polarisasi atau sudut datang yang menghasilkan sinar pantul terpolarisasi linear

Sumber polarisator: deretan celah paralel pada polaroid

Superposisi gelombang: perpaduan dua gelombang yang memiliki amplitudo dan panjang gelombang sama

T

Taraf intensitas bunyi: logaritma perbandingan intensitas bunyi terhadap intensitas ambang

Tegangan (stress): gaya per satuan luas pada sebuah benda yang cenderung mengakibatkan benda tersebut mengalami deformasi

Titik perut: titik-titik yang memiliki amplitudo maksimum

Titik simpul: titik-titik yang memiliki amplitudo nol

Toroida: solenoida yang melingkar

Transformator: disebut juga trafo, alat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik bolak-balik.

U

Ultrasonik: gelombang bunyi yang frekuensinya lebih dari 20 khz

W

Waktu paruh: waktu yang dibutuhkan oleh zat radioaktif sehingga keaktifannya menjadi setengah kali keaktifan semula

Indeks

A

akselerator partikel 102
amperemeter 134, 141, 149
amplitudo 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 21, 22, 30, 33, 38, 39, 47, 50, 133
analisaor 48, 49, 50, 51, 54
armatur 93, 104, 105, 126
arus induksi 115, 116, 117, 118, 116, 119, 125, 126, 129, 130, 145, 150
arus listrik bolak-balik 113, 114, 126, 127, 130, 131, 132, 145, 146
atom 56, 61, 72, 110, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 198, 203, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 218, 219, 220, 224, 225, 226, 227, 228,
aturan tangan kanan 87, 88, 90, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 116, 121, 129

B

Balmer, Johann Jakob 178
batang reaktor 221
berkas gelombang 13, 14, 16, 17, 164
Bohr, Niels 180, 181, 182, 186
Boltzmann, Ludwig 156, 157, 167

C

cepat rambat gelombang 3, 4, 5, 8, 9, 11, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 38, 54, 152, 154
Compton, A.H. 163, 167
Coulomb, Charles 58

D

Dalton, John 173, 174, 175, 186
dawai 10, 11, 19, 20, 22, 25, 26, 27, 29, 34, 38, 50, 51, 52, 54
de Broglie, Louis 165, 167
deret
 Balmer 178, 183, 186
 Bracket 178, 186
 Lyman 179
 Paschen 178, 183
 Pfund 178, 186
detektor
 radiasi 218, 224, 228
 sintilasi 225, 219, 218
dielektrik 74, 77, 82
difraksi 16, 18, 19, 24, 38, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 152, 154, 165
 cahaya 42, 43, 165
dualisme gelombang-partikel 155, 165

E

efek Compton 155, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 171, 203
efek Doppler 34, 35, 50, 51
efek fotolistrik 155, 159, 160, 161, 162, 163, 165, 166, 167, 168, 170, 172, 176, 219,
Einstein, Albert 191, 195, 161, 167
eksperimen Faraday 114, 117, 119, 150
eksperimen Michelson-Morley 192, 193, 194, 195, 204
elektromagnet 89, 93, 94, 102, 130, 194,
elektron 56, 59, 61, 70, 76, 82, 83, 99, 100, 103, 105, 109, 110, 120, 121, 153, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 189, 190, 196, 201, 206, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 218, 219, 220, 226, 227, 228,
elektrostatika 55, 56, 57, 61, 81, 182
emulsi film 218, 224, 225
energi foton 161, 162, 164, 166, 171, 172
energi gelombang 12, 13
energi kinetik relativistik 201, 202, 203, 204, 205
energi potensial listrik 55, 69, 73, 81, 166

F

Faraday, Michael 113, 114, 116, 122
fase gelombang 7, 8, 18, 194
fasor 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 150
fluks
 listrik 65, 66, 68
 magnet 114, 117, 118, 119, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 145, 148, 150, 153
fotoelektron 160, 161, 162, 163, 167, 169, 170, 172
foton 155, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 180, 181, 182, 183, 184, 188, 190, 203, 219, 227
Franklin, Benjamin 56, 57
frekuensi 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 38, 50, 52, 53, 54, 124, 127, 130, 131, 134, 140, 141, 147, 148, 149, 150, 152, 153, 154, 159, 161, 162, 163, 164, 166, 169, 170, 172, 190, 206,
frekuensi sudut 7, 8, 12, 18, 21, 131, 149, 152, 154
fungsi kerja 162, 163, 170, 172

G

gaya
 Coulomb 58, 59, 61, 63, 69, 81, 160
 inti 212, 224, 225, 226
 magnet 76, 85, 86, 87, 88, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 116, 121, 148, 174, 175,
gelombang 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52,

53, 54, 124, 126, 127, 129, 133, 134, 141, 152, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 178, 179, 181, 182, 184, 188, 189, 190, 193, 194, 195, 214,
air 1, 2, 3, 5, 12, 13, 20, 36
berjalan 1, 7, 8, 9, 15, 18, 19, 21, 22
bunyi 5, 6, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 33, 34, 37, 50, 51, 54, 129, 152
elektromagnetik 2, 3, 19, 24, 38, 156, 157, 159, 160, 164, 167, 179, 193, 214
kejut 36, 37, 50
longitudinal 5, 6, 18, 19, 20, 24, 27, 50
mekanik 2, 3, 19
pada tali 2, 4, 18, 19, 25
stasioner 1, 9, 10, 11, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 27, 50, 54
transversal 1, 4, 5, 6, 8, 9, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 46, 50, 54, 152
generator AC 127, 130, 134, 135, 137, 145, 147, 149, 151
ggl
induksi 114, 115, 117, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 129, 130, 135, 145, 148, 149, 150, 153
rata-rata 118, 119, 125
sesaat 117, 126
guci Leyden 75

H

hamburan Rutherford 176, 177
Henry, Joseph 122, 123
Hertz, Heinrich 160
hipotesis de Broglie 155, 165, 167, 168
hipotesis kuantum Planck 159, 161, 168
Hukum Coulomb 180, 212, 55, 58, 59, 61, 65, 66, 83
Hukum Gauss 65, 66, 67, 79, 81
Hukum Kekekalan Energi 69, 70, 161, 162
Hukum Lenz 114, 115, 116, 118, 129, 145
Hukum Peluruhan Radioaktif 216
Hukum Pemantulan Gelombang 13, 18
Hukum Pembiasan 14
Hukum Pergeseran Wien 158, 159, 168
Hukum Stefan-Boltzmann 156

I

impedansi 140, 141, 142, 147, 149, 151, 154
induksi elektromagnetik 113, 114, 117, 122, 126, 128, 130, 145, 146, 147
induksi medan magnet 208
induktansi 122, 123, 124, 125, 136, 142, 145, 149, 150, 151
diri 122, 123, 145
silang 123, 124, 145
induktor 113, 123, 124, 125, 134, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 149, 151, 153
infrasonik 24
intensitas
bunyi 30, 31, 32, 33, 38, 50, 52, 54
gelombang 1, 12, 18
interferensi 10, 14, 15, 16, 18, 19, 24, 33, 34, 37, 38, 39,

40, 41, 42, 43, 45, 46, 49, 50, 53, 54, 152, 154, 165, 193, 194, 195
cahaya 38, 39, 50
destruktif 14, 15, 50
konstruktif 14, 15, 39, 41, 50
interferometer Michelson 193, 208
inti atom 61, 110, 177, 178, 179, 180, 181, 183, 186, 188, 189, 190, 209, 210, 211, 213, 224, 225, 226
isotop 210, 222, 226

J

joule 69, 82, 170, 172, 182, 211

K

kamar kabut 218, 224
kapasitansi 73, 74, 75, 76, 77, 79, 83, 84, 151
kapasitas 73, 74, 79, 82, 83, 84, 153, 221
kapasitas kapasitor 73, 74, 79, 82, 83, 84
kapasitor 55, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 113, 124, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 149, 151, 153
kecepatan cahaya 189, 191, 193, 194, 195, 196, 198, 200, 202, 203, 204, 161, 169, 171
kerangka acuan inersial 192, 194, 195, 208
kesetaraan massa dan energi 191, 200
kestabilan inti 212
konstanta dielektrik 74, 82
konstanta kesebandingan 58, 61, 124
konstanta peluruhan 215, 216, 219, 228
konstanta Planck 159, 161, 162, 166, 169, 170, 171, 180, 189, 190
konstanta Rydberg 178, 183, 188
kuanta 159, 161, 181
kuat medan listrik 55, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 70, 73, 79, 81, 170

L

lambang inti 210, 213
lintasan partikel bermuatan 85, 100, 101, 106
lodestone 86

M

magnet 76, 81, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 106, 108, 109, 110, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 153, 154, 171, 174, 175, 176, 177, 196, 208, 219, 227
sementara 86, 91
tetap 86, 91, 95, 105, 114, 126, 129, 130
magnetisme 89, 116, 123
massa elektron 176, 180, 188, 189, 201, 207, 210, 213, 61, 70, 82, 103, 110, 165, 166, 170, 171, 172
massa neutron 211, 212, 213, 228
massa proton 210, 211, 212, 213, 226, 228



medan listrik 55, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 79, 81, 83, 84, 99, 154, 160, 170, 171, 174, 176, 177, 219, 227,
medan magnet 81, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 126, 127, 129, 130, 144, 145, 147, 148, 150, 153, 154, 171, 174, 176, 177, 196, 208, 219, 227,
Michelson, A.A. 193
mikrofon 126, 129, 130, 145, 147
Millikan, R.A. 175
model atom 173, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 186, 187, 188, 189, 190, 210, 110
Bohr 173, 180, 188, 189, 190, 210, 110
hidrogen 180, 181
Rutherford 173, 176, 178, 179, 180, 186, 210
Thomson 176, 177, 190
moderator 221, 222
modulus elastik 5, 6, 20, 154
zat padat 5
momen gaya magnet 85, 103, 104, 105, 110
momentum
foton 162, 163, 164, 171, 203
relativistik 199, 200, 204
sudut 180, 181, 184, 186, 188
Morley, E.W. 193
motor listrik 85, 86, 103, 104, 110, 126
muatan listrik 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 79, 81, 82, 83, 98, 100, 101, 152, 153, 154, 174,
negatif 56, 65
positif 56, 65, 69, 83
muka gelombang 13, 14, 18, 36, 37

N

neutron 56, 165, 174, 183, 188, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 220, 221, 224, 225, 226, 227, 228,
Newton, Isaac 192, 41
nilai efektif 132, 145
nilai rata-rata 131, 132, 145
nomor atom 210, 211, 212, 213, 214, 220, 226
nomor massa atom 210
nukleon 210, 211, 212, 213, 224, 228

O

Oersted, Hans Christian 85, 86, 87, 88, 106
osiloskop 134, 135, 150

P

panjang gelombang 2, 3, 5, 8, 9, 11, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 33, 38, 40, 41, 44, 45, 46, 49, 50, 52, 53, 54, 152, 154, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 178, 179, 181, 182, 184, 188, 189, 190
partikel
alfa 177, 227, 228
beta 211, 227

pathometer 37
pelayangan 33, 34, 50, 51
peluruhan inti 215, 216
pemuluran waktu 197, 198, 204, 205, 208
pencacah Geiger-Muller 218
penyusutan panjang 199, 200, 204, 205, 208
percobaan Quincke 33
periode 2, 3, 4, 5, 7, 8, 18, 20, 21, 121, 127, 131, 134, 148, 153, 154, 198, 206,
photomultiplier 219
pipa organa 27, 28, 29, 30, 50, 51, 52, 54, 152
terbuka 27, 28, 29, 30, 50, 51, 52, 152
tertutup 27, 28, 29, 30, 50, 52, 51, 152
Planck, Max 159
polarisasi cahaya 46, 47, 48, 54
polarisator 46, 47, 48, 49, 54
postulat Bohr 180, 181, 184, 185, 186
postulat Einstein 194, 206, 208
potensial
henti 160, 161, 162, 163
listrik 55, 69, 71, 72, 73, 79, 81, 82, 84, 160, 166
proton 56, 109, 153, 165, 174, 175, 176, 180, 183, 186, 188, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 224, 225, 226, 227, 228,

R

radiasi benda hitam 155, 156, 157, 159, 166, 167, 168, 169
radioaktivitas 209, 212, 213, 214, 220, 224, 225
radioisotop 221, 222, 223, 224, 225, 209
radiotherapy 222
rangkaiian kapasitor 74, 137
paralel 74, 75, 79
seri 74, 79
rapatan 5, 6, 24
reaksi
fisi 220, 221, 223, 224, 227, 228
fusi 220, 224, 227
nuklir 209, 220, 224
reaktor nuklir 210, 220, 221, 222, 224, 225
refleksi 13, 24
refraksi 14, 16, 24
relativitas kecepatan 196, 199, 204, 208
rem magnet 126, 129, 145, 147
renggangan 5, 24
resistor 113, 121, 131, 134, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 151
resonansi 24, 29, 30, 31, 50, 51, 52, 139, 140, 141, 147, 146
resonansi listrik 140, 141
rotor 104, 105, 126, 127, 222
Rutherford, Ernest 177, 186

S

simpangan 2, 4, 7, 9, 18, 20, 21
spektrum atom hidrogen 173, 178, 183, 186
Stefan, Joseph 156, 167
struktur Inti 209, 210
Sturgeon, William 89

T

teori atom 173, 174, 186, 187
 Dalton 173, 174
teori foton Einstein 155, 160
teori kuantum 155, 159, 164, 168, 169
teori Maxwell 159
teori relativitas khusus 191, 194, 195, 202, 205, 163
teori relativitas Newton 191, 192, 193, 196, 197, 204, 205
tetes minyak Millikan 175, 176, 177
Thomson, J.J. 174, 175, 177, 186
titik perut 10, 11
titik simpul 10, 11, 21
toroida 93, 94, 95, 106, 151, 107
transformator 86, 126, 127, 128, 129, 133, 147, 149, 153

U

ultrasonik 24, 34, 36, 37, 38
ultrasonografi 37

V

voltmeter 134, 141, 150

W

waktu proper 198
weber 65, 89, 117, 118, 119, 125, 148
Wien, Wilhelm 158, 167

Y

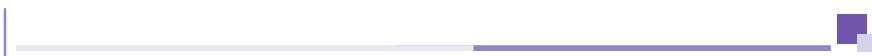
Young, Thomas 39, 41

■ | Daftar Pustaka

- Giancoli, Douglas C. 2000. *Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics, Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Halliday, David, Robert Resnick, dan Jearl Walker. 2001. *Fundamentals of Physics, Sixth Edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Hewitt, Paul G. 1998. *Conceptual Physics, Eight Edition*. New York: Addison Wesley Longman.
- Jones, E.R. dan Chiulders, R.L. 1994. *Contemporary College Physics, Second Edition*. New York: Addison Wesley Longman.
- Tipler, Paul A. 1991. *Physics for Scientists and Engineers, Third Edition*. New Jersey: Worth Publisher.
- Tim Redaksi Dorling Kindersley. 1997. *Jendela IPTEK, Cetakan Pertama*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Tim Redaksi Pustaka Setia. 2005. *Panduan SPMB IPA 2006*. Bandung: Pustaka Setia.
- Tim Redaksi Usborne Publishing LTD. 2000. *Science Encyclopedia*. London: Usborne Publishing LTD.
- Tim Widya Gamma. 2005. *Pemantapan Menghadapi Ujian Nasional (UN) dan Ujian Sekolah (US) SMA IPA 2005/2006*. Bandung: Yrama Widya.

Sumber Lain: www.batan.go.id





Praktis Belajar Fisika

Disajikan untuk menambah pemahaman siswa tentang kehidupan manusia dan berbagai penemuan penting di bidang fisika. Buku ini dapat mengarahkan siswa untuk berpikir cerdas dan kreatif dalam memecahkan masalah di lingkungan sekitar.



ISBN : 978-979-068-812-4 (No. jil lengkap)
ISBN : 978-979-068-815-5

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi: Rp16.693,-

Di unduh dari : Bukupaket.com